АКАДЕМИЯ НАУК
УКРАИНСКОЙ ССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКОВА ДУМКА» КИЕВ — 1973

Н. М. Амосов
А. М. Касаткин
Л. М. Касаткина
С. А. Талаев

Под общей редакцией
академика АН УССР
Н. М. АМОСОВА

# Автоматы и разумное поведение

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

6Ф01
А22

УДК 621.391,612.82

Рецензенты:

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АПН СССР
М. Н. СКАТКИН,

КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
Э. М. КУССУЛЬ

Редакция физико-математической литературы

А $\frac{3314-355}{М221(04)-73}$ 11—73

©Издательство «Наукова думка».

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Арсенал подходов к моделированию сложных объектов, и в частности к исследованию психики человека, с целью решения проблемы «искусственный разум» непрерывно растет. Академик АН УССР Н. М. Амосов и его сотрудники являются авторами подхода, названного ими эвристическим моделированием. Именно необычность и новизна объясняют многочисленные факты непонимания и поспешной критики этого направления.

Сущность эвристического моделирования состоит в следующем. Каждый специалист-психолог имеет некоторые представления о связи переменных, характеризующих психическое состояние личности или коллектива людей. Такие представления образуют то, что мы называем опытом специалиста. Допустим, к примеру, что Вы как специалист уверены, что «страх» повышает «агрессивность», «усталость» снижает «внимание» и т. п. Если это так, то почему не изобразить эти зависимости при помощи простых графиков, уравнений или вычислительных алгоритмов (подпрограмм) и не ввести их в общую программу вычислительной машины для того, чтобы посмотреть, как ведет себя вся система таких зависимостей и подпрограмм в целом? Обратите внимание на то, что в состав априорной информации входят только характеристики и подпрограммы элементов системы, которые Вам приходится изобретать на основании общего опыта работы с людьми. Машина же покажет суммарный эффект действия всех элементов в системе, которая и является моделью искусственного разума. К тому же для такого моделирования разума не требуется никаких конкретных экспериментальных данных. Характеристики подпрограммы элементов системы изобретаются человеком — автором модели и составляют существенную часть априорной информации, вводимой в машину. Разумеется, переменные в указанных характеристиках («страх», «внимание», «усталость» и др.) весьма условны. Авторы часто не могут дать точное определение терминов переменных и тем более измерить их практически на человеке. Однако, как отмечалось, конкретных измерений и не требуется. Нужно только знать, что понимается под этими условными названиями, даже если это понимание «размытое», «небулярное», «диффузное».

Историческое развитие методов моделирования сложных систем подтверждает целесообразность применения эвристического моделирования: сейчас уже во всем мире широко применяются подобные методы для моделирования сложных социальных, экономических и экологических систем. Наибольшую известность получила работа американского ученого Дж. Форрестера «Динамика мира» (1971 г.), в которой даны прогнозы качества условий жизни, загрязнения биосферы Земли и роста народонаселения до 2100 г. Метод Форрестера (метод динамического моделирования) отличается от метода Н. М. Амосова только тем, что в нем характеристики элементов системы масштабируются по одной экспериментальной точке (по данным 1970 г.). Таким образом, приоритет в открытии метода эвристического моделирования, получившего широкое распространение, принадлежит Н. М. Амосову. Как известно, по поводу метода Форрестера

высказаны критические замечания и возражения (см., например, «Вопросы философии», 1973, № 1—3). Прежде всего оспариваются предложенные характеристики элементов системы и подчеркивается большая зависимость результатов моделирования от незначительных изменений этих характеристик. Модели Н. М. Амосова, как и модели Форрестера, носят весьма субъективный характер и поэтому малоубедительны. Тем не менее они имеют право на существование благодаря своей чрезвычайной гибкости: каждому, кто уверен в том, что автором модели допущена та или иная ошибка, предоставляется простая возможность исправить ее в модели и посмотреть на новый результат моделирования, в котором учтены новые предложения, допущения и ограничения.

Н. М. Амосов и Дж. Форрестер подчеркивают, что не претендуют на точный количественный прогноз поведения системы. Они предлагают модели лишь для общего качественного исследования сложных объектов. Не воспользоваться возможностью исследования совместного действия элементов системы, о каждом из которых существует некоторая информация, естественно, нет причин. Такая возможность предоставляется современными вычислительными машинами, и заслуга Н. М. Амосова и его сотрудников состоит в том, что они обратили на нее внимание.

Предлагаемое исследование основано на общепризнанном ныне методе, но в силу особенностей этого метода содержит лишь качественные результаты, отражающие субъективные предположения авторов модели. Иными словами, книга рассчитана на специалистов, для которых даже полемические соображения и субъективные гипотезы могут стать стимулом в дальнейшей разработке моделей искусственного интеллекта.

В последнее время появились и другие подходы к использованию машин для моделирования интеллекта, например объективные методы прямого моделирования (эвристической самоорганизации), не требующие изобретения характеристик или подпрограмм элементов системы и дающие наиболее точные количественные результаты. Эти методы отличаются по характеру необходимой априорной информации и поэтому области их применения различны. Объективные методы ни в коей мере не умаляют значения субъективных, область применения которых, при правильном понимании и использовании, будет расширяться.

Член-корреспондент АН УССР
*А. Г. Ивахненко*

Искусственный разум — одна из наиболее интересных и волнующих проблем современной науки. Она имеет два аспекта — теоретический и прикладной. Целью теоретических исследований является разработка методов построения систем (физических или математических), которые, не уступая по эффективности человеческому мозгу, могли бы обеспечивать решение разнообразных сложных задач, не уступающих сложности задач, решаемых человеком. Речь идет не только о строго сформулированных на каком-либо формальном языке задачах, но и о задачах, представленных на содержательном уровне или выраженных средствами обычного разговорного языка. Исследования в этой области часто связаны с изучением структуры мыслительных процессов человека и широко используют данные психологии, нейрофизиологии и других наук о мозге. Разрабатывая искусственный разум, мы вынуждены расширять, углублять и делать конструктивными наши знания о разуме естественном.

В прикладном аспекте исследования по искусственному разуму составляют новый, высший, этап развития процессов автоматизации производственно-технической и интеллектуальной деятельности человека. Характерным для этого этапа является стремление автоматизировать наиболее сложные формы практической деятельности, относимые по традиции к проявлениям сугубо человеческих способностей. Таким образом, речь идет о построении машин, которые смогут эффективно заменить человека не только при выполнении монотонной и утомительной в физическом отношении работы, но и в деятельности по управлению сложными системами и процессами, принятию решений в трудно поддающихся обычному анализу ситуациях, конструированию, составлению прогнозов и т. п. В настоящее время этот процесс находится на начальной стадии развития. Дальнейшее его течение тесно связано с прогрессом в области теоретических исследований по искусственному разуму.

Широкий круг вопросов и перспективность исследований привлекли к проблеме искусственного разума специалистов различного профиля — математиков, инженеров, психологов и др. Первые серьезные исследования были проведены математиками и касались проблем автоматизации интеллектуальной деятельности человека при доказательстве теорем, решении игровых задач и т. п. Вскоре, однако, была осознана необходимость более широкой постановки задач. Стало понятно, что наиболее интересные и практически важные результаты могут быть получены только путем воспроизведения в автоматах неформальных приемов человеческого мышления. Для решения задач такого типа были широко использованы эвристические приемы и методы, которые остаются основным инструментом построения «разумных» автоматов до настоящего времени. Арсенал приемов такого рода весьма широк и включает как отдельные полезные эвристики (например, сокращающие перебор), так и хорошо организованные эвристические процедуры построения моделей (например, процедуру эвристического программирования). Классификация эвристических приемов пока, к сожалению, не разработана.

Использование эвристических приемов и методов привело к новым интересным результатам. Однако в проведенных разработках «крен» в сторону воспроизведения функций с хорошо выраженной логической структурой сохранился. Никого сейчас особенно не удивит появление, например, еще одной программы классификации или, скажем, решения формально-логических задач одного класса. Таких автоматов с «узко направленным интеллектом» создано достаточно много. В то же время воспроизведение менее формальных аспектов человеческой деятельности по-прежнему вызывает серьезные затруднения. Прежде всего это касается «обычных», простых, на первый взгляд, форм поведения. Однако структура решения таких «простых» задач на самом деле весьма сложна. Более того, мыслительные процессы, ответственные за их решение, составляют неотъемлемую часть процессов, организующих любое действительно сложное поведение человека.

В последние годы исследования по построению автоматов, ориентированных на решение задач упомянутого типа, широко развиваются в области конструирования роботов — автономных технических систем, снабженных устройствами, обеспечивающими непосредственное воздействие на окружающую среду. Получены важные и весьма эффектные результаты. В подавляющем большинстве случаев, однако, роботы конструируются для решения узких технических задач (обслуживание определенных станков, транспортировка деталей и т. п.) и способны работать лишь в средах с малым разнообразием. Центральными при построении роботов являются проблемы организации процессов восприятия информации о среде и построения на основе этой информации системы адекватных поведенческих реакций. Структуры, реализующие эти функции, составляют «мозг» робота, и именно при их разработке могут быть использованы данные о механизмах и структуре решения соответствующих задач человеком.

Таким образом, одна из актуальных задач в области исследований по искусственному разуму состоит в том, чтобы путем изучения и моделирования основных закономерностей человеческого мышления разработать методы синтеза автоматов, воспроизводящих разумную деятельность человека при его взаимодействии с естественной средой. Этой области и были посвящены исследования авторов книги, проводившиеся ими в течение ряда лет. В качестве конкретного объекта моделирования были избраны процессы формирования «двигательного» поведения — планирование и целенаправленное передвижение человека в естественной среде. Поведение такого рода связано с решением целого ряда задач неформального плана и рассматривается как характерный пример сложной целесообразной деятельности человека — деятельности, логическая структура которой выражена весьма слабо и проблема автоматизации которой является сейчас одной из наиболее актуальных проблем искусственного разума.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

# Эвристические методы в проблеме „искусственный разум"

*Раздел I*

# ИСКУССТВЕННЫЙ РАЗУМ И МОДЕЛИ РАЗУМНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Развитие кибернетики и вычислительной техники послужило стимулом к интенсивному развитию исследований в новых для точных наук областях знаний. Направления, связанные с использованием цифровых вычислительных машин (ЦВМ), возникли в психологии, нейрофизиологии, экономике и ряде других наук, где применение количественных методов сдерживалось до сих пор отсутствием адекватной техники. По мере своего развития эти направления обособлялись, формировали собственный понятийный и технический аппарат. Новые технические возможности влекли постановку новых задач. В то же время проявилась и общность между не связанными ранее областями исследований. Огромную роль в этом сыграл и развиваемый кибернетикой единый подход к изучению объектов различной природы.

Результатом всех перечисленных процессов явилась определенная перегруппировка традиционных направлений научных исследований. Оказались, например, тесно связанными область изучения нейрофизиологических образований в коре головного мозга, некоторые области формальной логики и область конструирования систем, обладающих высокой надежностью. Сложившаяся в последние десятилетия группа научных направлений, связанных с решением проблемы построения автоматов, способных к сложному, «разумному» поведению, составила основу нового, более общего направления, получившего название искусственный разум. Это название (будем пользоваться его сокращением — ИР) может быть использовано не только для обозначения определенного направления исследований. Говорят также о *системах* ИР, имея в виду «разумные» системы, разрабатываемые упомянутым направлением; о *проблеме* ИР, как о проблеме, разрабатывающей принципы и технические приемы построения упомянутых систем; об *области* ИР, имея в виду совокупность вопросов, прямо или косвенно связанных с решением упомянутой проблемы.

Мы полагаем, что существующее в настоящее время действительно сложное и плохо поддающееся анализу состояние разработок в области искусственного разума свидетельствует отнюдь не об отсутствии общей проблематики или надуманности самой проблемы. Напротив, эти трудности связаны с ее развитием и становлением. Усилия, которые прилагает множество исследователей к ее разработке, позволяют надеяться на то, что в недалеком будущем проблема благополучно преодолеет кризисный этап своего развития, приобретя четкую и ясную структуру.

До тех пор, однако, пока этого не произошло, оценка значимости выполненных работ вызывает определенные затруднения. Поэтому, предлагая на суд читателей полученные нами результаты, мы считаем необходимым предпослать

основному содержанию книги изложение нашего взгляда на проблему ИР. Это изложение не будет носить обзорного характера — мы стремились лишь наметить границы той области, в которой проводились исследования, и указать в том виде, как нам это представляется, возможные связи с другими направлениями исследований по проблеме.

*Глава 1*

## ПРОБЛЕМА «ИСКУССТВЕННЫЙ РАЗУМ»

Мы рассматриваем ИР как одно из направлений более широкой и развитой проблемы — проблемы автоматизации. Автоматизация того или иного объекта всегда является таким процессом, при котором функции, выполнявшиеся ранее человеком, передаются различного рода техническим устройствам. Проблемы автоматизации есть, следовательно, проблемы разработки теоретических принципов и практических методов построения устройств, способных в заранее заданных конкретных условиях организовывать поведение, в некотором смысле эквивалентное поведению находящегося в таких же условиях человека. Уточним сказанное.

Говоря о поведении, мы использовали этот термин в узком смысле, обозначая им упорядоченную во времени и пространстве совокупность операций, выполняемых человеком или машиной и непосредственно направленных на изменение окружающей среды.

Операции, выполняемые техническим устройством, должны обеспечить тот же результат, что и в случае целенаправленной деятельности человека. При этом системы операций, выполняемые человеком и машиной, могут быть различными как в отношении их пространственно-временной организации, так и в отношении характера отдельных операций. При автоматизации требуется лишь *функциональная эквивалентность* поведений человека и машины, т. е. совпадение конечных результатов поведения в обоих рассматриваемых случаях. Именно в смысле такой функциональной эквивалентности говорят о машинах, управляющих различными процессами, решающих задачи и т. п.

Естественно, что функциональная эквивалентность поведений человека и машины может быть достигнута только в рамках каким-то образом ограниченных конкретных условий. Конкретные условия, в которых организуется целенаправленное поведение человека или машины, определяются, прежде всего, объемом и сложностью решаемых задач.

## § 1. *Задачи автоматизации разумной деятельности*

Попытки автоматизации сложных видов человеческой деятельности показали, что современный аппарат теории автоматического управления недостаточно эффективен. Возможны различные пути преодоления существующих здесь трудностей. Вокруг одного из них и объединены усилия исследователей. В самом общем виде используемый ими подход можно охарактеризовать следующим образом.

Рассматривается поведение человека, обеспечивающее достижение поставленной цели в определенной среде. Так как методы синтеза искусственных устройств с функционально эквивалентным поведением не разработаны, то относительно возможного вида и свойств таких искусственных устройств заранее можно сказать очень мало. В природе, однако, существует система, решающая нужные задачи,— человек. Его, следовательно, можно рассматривать в качестве «прототипа» искомого устройства.

Такой подход развивается в настоящее время рядом направлений. Последние разделяются обычно по характеру решаемых ими задач. Так, говорят о направлениях, исследующих проблемы распознавания образов, решения интеллектуальных задач (доказательство теорем, математические задачи, игры), автоматического перевода и др. Можно проводить и более детальную классификацию, выделяя в качестве отдельных направлений в области ИР работы по решению еще более узких классов задач, например: распознавание букв фиксированного алфавита, доказательство геометрических теорем и т. п. Такие классификации в ряде случаев оказываются весьма полезными. Однако при рассмотрении проблемы ИР в целом более важно фиксировать не классы задач, решаемых в рамках тех или иных конкретных направлений, а особенности реализуемых этими направлениями исследований, т. е. особенности практического использования ими знаний о человеке при построении автоматических систем. Поэтому здесь и в дальнейшем мы не будем рассматривать специфику решения частных задач ИР. Нас будут интересовать те общие черты, которые характерны для различных направлений, те принципы синтеза «разумных» автоматов, которые объединяют многообразные работы по ИР в самостоятельную область научных исследований.

Укажем теперь некоторые особенности, характеризующие проблему ИР в целом. В принципе — это *прикладная, техническая* проблема, поскольку окончательным результатом проводимых в ее рамках исследований является не решение задач познавательного характера, а разработка тех или иных технических устройств автоматизации сложной деятельности

человека. Отличительный признак этой проблемы — ее направленность на *исследование человека и человеческой деятельности* как прототипов разрабатываемых систем. Основным требованием к разрабатываемым системам является функциональная эквивалентность поведения технических устройств и поведения человека в определяемом заранее классе внешних условий. Поскольку в рамках ИР рассматривается, как правило, достаточно сложное поведение человека и машин, последнее требование часто формулируется как требование разумности поведения технических устройств. Наконец, проблема ИР имеет комплексный характер, что естественным образом следует из ее основных особенностей. Действительно, решая задачи автоматизации в самых различных областях научно-производственной деятельности, разработчики ИР в каждом отдельном случае должны максимально использовать сведения, имеющиеся в соответствующей конкретной области. С другой стороны, рассматривая человека в качестве прототипа своих систем, разработчики неизбежно вступают в контакт с целым рядом конкретных наук, изучающих человека.

Имея в виду изложенные особенности, мы можем с бо́льшим, чем ранее, основанием говорить об искусственном разуме как о самостоятельной научной проблеме. Составляя одно из направлений автоматизации, проблема ИР в качестве своей основной задачи рассматривает задачу построения устройств, способных автономно выполнять те или иные сложные функции. Проблема ИР, однако, развивает в этой области свой особый подход, в основе которого лежит многостороннее и последовательное изучение человека, его поведения. Ясно, что при таком подходе ставятся специфичные задачи и выполняются исследования, не характерные ни для одной из традиционных технических областей. Этот подход, этот комплекс своеобразных проблем и выделяют ИР как обособленное научно-техническое направление.

## § 2. *О структуре проблемы*

Рассматривая структуру проблемы ИР, следует, видимо, воспользоваться наиболее общим и традиционным разделением всех изучаемых в ней вопросов на теоретические и технические.

В теории ИР, как и в теориях многих других наук, можно условно выделить две части. Одна из них разрабатывает формальные средства описания, языки и математический аппарат, обслуживающие проблему в целом. В настоящее время эта часть теории ИР развивается в рамках более обширной области языка и аппаратных средств кибернетики [19,

59]. Другую часть теории составляют содержательные представления, используемые в данной области. Здесь разрабатываются принципы, категории и понятийный аппарат проблемы ИР [5, 40, 41, 49, 60]. Именно в этой части теории сформулированы основные взгляды на проблему и подходы к изучению человека как прототипа автоматических систем управления. Некоторые из вопросов содержательной теории ИР и будут рассмотрены в настоящем разделе.

Известно, что процесс решения задач автоматизации может быть в общем случае разделен на три последовательных этапа: составление описания объекта управления, задание критериев управления или функций цели и, наконец, разработка на этой основе общей стратегии управления и правил принятия конкретных решений. В дальнейшем задача сводится к построению технических средств, вырабатывающих управляющие воздействия в соответствии с найденными правилами.

При автоматизации управления сложными системами реализация каждого из этапов решения задачи связана с существенными трудностями. Именно эти трудности и пытаются разрешить, обращаясь к изучению человека.

Изучая физиологию и психику человека, мы, к сожалению, еще не в состоянии выделить и использовать при решении технических задач те принципы, тот «внутренний язык», с помощью которых мозг решает каждую из основных задач управления: составление описания объекта, формирование цели, синтез правил или алгоритмов принятия решений. Можно, однако, не задаваясь вопросом о способах решения мозгом каждой из упомянутых задач в отдельности, исследовать целостные нервные или информационные механизмы и структуры, порождающие поведение человека.

Одна из важных особенностей этого подхода состоит в следующем.

Любое исследование связано с выдвижением некоторых гипотез, объясняющих известные факты, и с последующей экспериментальной проверкой вытекающих из этих гипотез предсказаний. В случае исследования сложных объектов (а человеческое поведение, несомненно, является таковым) эта схема нарушается. Возникающие здесь трудности связаны с тем обстоятельством, что достаточно интересные и содержательные гипотезы о сложных системах сами неизбежно являются сложными системами высказываний. А это означает, что выведение проверяемых следствий из таких гипотез является трудной задачей, требующей для своего решения развития специальных методов и средств. Принципиальное решение этой задачи уже найдено современной наукой. Оно состоит в том, что проверяемая гипотеза, сформулиро-

ванная в конструктивном виде, подвергается моделированию, как правило, с помощью ЦВМ.

Модель гипотезы, таким образом, «отчуждается» от субъективных и ограниченных авторских оценок и может явиться объектом тщательного и независимого исследования.

Результаты экспериментов с моделью и составляют, по существу, полную систему предсказаний, вытекающих из предположений и допущений, входящих в исходную гипотезу. В случае, если предсказания модели совпадают с известными или полученными в ходе специальных экспериментов данными, гипотеза может считаться правомерной. В противном случае гипотеза корректируется, в ее модель вносятся изменения и проверка повторяется.

Существенно, что на этом пути могут быть получены подтверждения лишь *правомерности* гипотезы. Истинность же ее может быть установлена только в ходе проверки каждого из составляющих гипотезу предположений путем непосредственного исследования объекта. Это связано с тем обстоятельством, что всякое поведение, всякая система наблюдаемых признаков могут, как правило, порождаться различными внутренними механизмами объекта. Иными словами, всегда может существовать некоторое множество гипотез, удовлетворительно объясняющих данную совокупность эмпирических фактов. Процедура модельной проверки гипотез может быть построена таким образом, чтобы выявлять их сравнительную «силу». Это позволяет рассматривать лишь наиболее удачные из множества правомерных гипотез.

При конструировании сложных моделей поведения человека неизбежно придется создавать различного рода объяснительные или описательные гипотезы и, следовательно, использовать для их проверки модельный метод. Спецификой работы является то, что мы не стремимся к установлению истинности выдвигаемых гипотез; *для проблемы ИР достаточно, чтобы эти гипотезы были правомерны.* В самом деле, определенная ранее особенность работ по ИР состоит в требовании только функциональной эквивалентности поведений человека и разрабатываемых устройств. А это означает, что для решения практических задач могут быть использованы модели любых правомерных гипотез, поскольку признаком их правомерности как раз и является совпадение поведений модели и рассматриваемого объекта.

Таким образом, исследуя поведение человека с целью создания искусственного разума, мы имеем возможность самым широким образом использовать при построении рабочих гипотез различного рода данные, имеющиеся в конкретных науках, правдоподобные аналогии, удобные предположения, упрощения и т. п. При этом можно исключать из рассмотрения неудовлетворительные и отбирать лучшие варианты

гипотез путем исследования поведения их вычислительных моделей.

Дальнейшее рассмотрение вопросов содержательной теории ИР будет проведено ниже, при описании основных направлений в моделировании поведения. А пока завершим краткое обсуждение общей структуры проблемы упоминанием о технических средствах реализации систем ИР.

Одним из наиболее распространенных способов реализации систем искусственного разума является их представление в виде программ для ЦВМ. Широкое использование этого способа обусловлено тем, что в качестве технических средств реализации сложных информационных моделей ЦВМ обладают рядом ценных свойств. Важнейшим из них является алгоритмическая универсальность.

Принципиальный недостаток цифровых вычислительных машин — последовательный способ их действия. Недостаток этот проявляется при реализации на ЦВМ моделей большой сложности, имеющих, как правило, параллельные цепи. Вытягивание параллельных процессов «в цепочку», необходимое для их представления в ЦВМ, приводит не только к увеличению затрат машинного времени, но и к дополнительным затратам памяти для хранения промежуточных результатов. В некоторых случаях такие непроизводительные затраты становятся недопустимо большими и могут полностью обесценить преимущества ЦВМ.

Перспективы использования ЦВМ для реализации систем ИР связаны, прежде всего, с дальнейшим совершенствованием вычислительной техники и средств математического обеспечения. Большое значение для развития ИР будет иметь, в частности, создание машин пятого поколения, обладающих значительными объемами оперативной памяти и обеспечивающих реализацию параллельных процессов переработки информации. В настоящее время развитие работ по ИР тесно связано с прогрессом в разработке специальных технических средств моделирования, ориентированных на реализацию в них параллельных процессов. Арсенал средств такого рода велик и представлен прежде всего электронной техникой. Для решения некоторых задач моделирования оказывается целесообразным применение устройств, принцип действия которых основан на использовании свойств физико-химических процессов, протекающих в растворах, коллоидах и т. п. (например, управляемые элементы с памятью — различного рода химотроны, мемисторы и др.). Широко используются также комбинированные системы, содержащие цифровую и аналоговую части. При этом аналоговая часть, реализованная с помощью электронных схем и специальных устройств, предназначается для модельного представления параллельно протекающих процессов, цифровая — для

логических и вычислительных операций, имеющих последовательный характер. Использование комплексов такого рода оказывается, как правило, весьма эффективным. Возникающие здесь специфические задачи связаны с организацией взаимодействия между цифровыми и аналоговыми частями устройства.

Таким образом, развитие техники ИР находится в тесной связи с прогрессом в области электроники и вычислительной техники. В области ИР, однако, создан и ряд специальных средств, учитывающих особенности работ по построению сложных моделей. К таким средствам можно отнести специализированные алгоритмические языки (типа IPL), физические элементы, используемые при моделировании нейронных сетей, и т. п. В целом же проблема ИР оказывается в состоянии как ассимилировать новые достижения техники, полученные в других областях (например, голографическая и лазерная техника используются для моделирования памяти), так и со своей стороны оказывать влияние на их развитие, предъявляя свои требования к разрабатываемым устройствам и выдвигая новые идеи их построения. Такого рода взаимное обогащение способствует дальнейшему развитию исследований по проблеме ИР.

*Глава 2*

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ МОДЕЛЕЙ РАЗУМНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Прежде чем приступить к непосредственному изложению конкретных результатов, полученных нами при моделировании разумного поведения, рассмотрим основные направления работ по этой проблеме.

Для каждого направления характерна своя схема проведения исследований, предполагающая определенный способ рассмотрения человека как прототипа систем ИР. Обсуждению принципиальных особенностей различных схем такого рода и посвящена настоящая глава.

### § 1. *Феноменологические модели поведения*

Это направление исследований связано с разработкой автоматических систем, которые, по сути, представляют собой (или содержат в себе) действующие модели внешнего наблюдаемого поведения человека. Для данного направления характерна примерно следующая схема проведения исследований.

1. Пусть необходимо построить автомат для решения некоторой задачи при условии, что применение традиционных методов синтеза либо невозможно, либо неэффективно. Пусть также имеется человек (или группа людей), способный решать интересующую нас задачу. Будем считать, что

искомый автомат решает поставленную задачу, если его поведение функционально эквивалентно поведению человека. В соответствии со спецификой задачи зададим критерии функциональной эквивалентности.

2. Организуем наблюдение за поведением человека, решающего задачу в определенной контролируемой ситуации, и будем фиксировать в протоколах производимые им действия и словесные высказывания.

3. Анализируя протоколы, попытаемся выявить и описать систему (т. е. состав и последовательность) производимых человеком действий, направленных на преобразование исходной ситуации к виду, являющемуся решением задачи.

4. В соответствии с полученным описанием построим устройство, реализующее соответствующую систему операций. Будем полагать, что такое устройство и является искомым автоматом.

5. Исследуем поведение автомата при решении задачи. Если оно недостаточно полно (по отношению к принятым критериям) соответствует поведению человека или по каким-либо другим причинам не является удовлетворительным, то: либо обратимся еще раз к выполнению п. 4 и произведем необходимые изменения в автомате, либо вернемся еще раз к п. 3 и попытаемся уточнить описание поведения, либо, уточнив задачу и условия эксперимента, вернемся к выполнению п. 2. Будем продолжать такой циклический процесс до тех пор, пока поведение автомата не будет в достаточной мере удовлетворять предъявляемым к нему требованиям.

Остановимся на некоторых особенностях описанной схемы и проиллюстрируем их на примере конкретной разработки. Следует отметить, что рассматриваемое направление является одним из наиболее развитых в области ИР, и в его рамках получен ряд интересных результатов, имеющих как познавательное, так и прикладное значение. Одну из таких работ, имеющую в целом прикладную направленность, мы и используем в качестве примера. Эта работа выполнена Дж. Кларксоном и посвящена задаче принятия решений при выборе политики инвестиций [33]. Автором разработана и реализована в виде программы для ЦВМ модель, иллюстрирующая действия банковского служащего — инвестора. Задачей инвестора является размещение доверенного ему клиентом капитала в тех или иных акциях и облигациях. При этом инвестор должен принимать во внимание весьма разнообразные сведения о деятельности фирм и рыночной стоимости их акций, предсказания относительно будущего состояния экономики и фондовой биржи, установленные законом ограничения на процесс доверенной инвестиции, влияние налогов на доход от тех или иных ценных бумаг, стабильность этого дохода и, наконец, пожелания доверителя

относительно сочетания дохода и прироста капитала. Выбор плана инвестирования в этих условиях можно отнести к задачам принятия решений при неполной информации. Строгие методы решения таких задач пока не разработаны. В то же время банковские служащие справляются с ними достаточно хорошо. Это и создает ситуацию, описанную в п. 1 нашей схемы, когда целесообразно искать решение задачи путем исследования поведения человека.

**Изучение деятельности.** Посмотрим, как реализуется в рассматриваемой работе [33] этап наблюдения за поведением инвестора. Цитируем: «Изучение проводилось путем опроса служащих и наблюдения за работой опекунских советов, обсуждающих ранее вынесенные и предстоящие решения. Впоследствии внимание было сосредоточено на работе служащего одного из банков, несущего основную ответственность за все решения, касающиеся выбора портфелей внутри данного банка... С согласия служащего его действия в процессе принятия решения фиксировались в «протоколах». Эти протоколы регистрировали весь процесс принятия решений служащим в ходе его текущей работы» [33, стр. 360]. Видно, таким образом, что, получив общее представление об исследуемом процессе путем изучения работы различных групп людей, автор в дальнейшем сосредоточивает внимание на поведении одного служащего. Такой переход весьма характерен для рассматриваемой группы исследований. Изучение поведения именно одного человека является, видимо, целесообразным в связи со следующим обстоятельством. У каждого специалиста вырабатывается свой специфичный «стиль» решения задач, и у разных людей он, естественно, различен. Избавиться от связанных с этим трудностей можно двумя путями. Один из них — исключить из рассмотрения несущественные «стилевые» особенности путем установления наблюдений за достаточно большой группой людей. Ясно, что это требует больших затрат времени и усилий. Другой путь предполагает разработку модели поведения именно высококвалифицированного специалиста. В результате модель, очевидно, может воспроизвести и некоторые несущественные особенности его поведения. Это является, однако, вполне приемлемой платой за упрощение исследования в целом, тем более что к оптимальности разрабатываемых таким способом моделей и решений жесткие требования, как правило, не предъявляются.

Существенной особенностью рассматриваемого этапа является осознанное и последовательное использование феноменологического подхода в описании поведения. Это означает, что в протоколах фиксируются только наблюдаемые факты поведения, непосредственно связанные с решением задачи. Вот как формулирует эту особенность своих иссле-

дований Кларксон: «Протоколом» называется дословная запись мыслей и действий субъекта, думающего или решающего задачу вслух. Эта методика дает нам подробное описание того, что делает человек, и, следовательно, позволяет избежать трудностей, присущих методике бесед и заполнения анкет, в которых человека просят объяснить, почему он производит то или иное действие» [33, стр. 361]. Подчеркнутая здесь направленность исследования на описание внешнего поведения, на фиксацию только наблюдаемого «что делается» и является характерной чертой рассматриваемого подхода в целом.

**Составление описания. Гипотезы.** Третий этап исследований состоит в выяснении операционной структуры изучаемой деятельности и проводится путем анализа имеющихся протоколов. В большинстве случаев проанализировать сложную деятельность достаточно трудно, так как описание необходимо представить в возможно более компактной и конструктивной форме. Как правило, оказывается возможным выделить в изучаемой деятельности более или менее крупные «блоки» операций. Это, однако, составляет лишь небольшую часть всей работы. Основное ее содержание сводится к установлению «тонкой» структуры блоков. Здесь исследователь сталкивается с анализом сложной и гибко организованной системы операций, содержащей большое количество логических функций, условных переходов, процедур поиска и т. п. При формализации такой системы исследователю постоянно приходится выдвигать гипотезы относительно конкретного вида тех или иных зависимостей, числовых значений вводимых им параметров, коэффициентов и т. п. В ходе исследования отдельные гипотезы могут уточняться или отбрасываться. Основанием для этого служит постоянное обращение к анализу протоколов. Зачастую также приходится возвращаться к предыдущему этапу и организовывать новые целенаправленные наблюдения за поведением человека, дополняя таким образом анализируемый материал и получая основания для выдвижения новых и коррекции уже имеющихся гипотез. Результатом таких действий является построение некоторого варианта описания, удовлетворяющего исследователя. Это описание имеет две важных особенности.

Первая из них состоит в том, что построенное описание неизбежно содержит в себе некоторые произвольные или недостаточно обоснованные моменты. Иначе говоря, описание имеет гипотетический характер. Если это не так и исследователь построил адекватное описание в виде строго доказательной дедуктивной конструкции, то это означает прежде всего, что он имел дело с достаточно простой задачей и следует подумать, нельзя ли решить ее более простыми

способами. В самом деле, невозможность использования корректного математического аппарата описания является одним из основных признаков сложности, а разрабатываемые нами методы ИР предназначены прежде всего для решения сложных задач. Гипотетический характер описания является, таким образом, практически неизбежной особенностью работ, основанных на анализе протоколов поведения. В связи с этим можно сказать, что содержанием третьего этапа является именно построение рабочей гипотезы относительно операционной структуры рассматриваемого поведения.

Вторая особенность полученного описания также связана со сложностью рассматриваемого поведения человека. Она состоит в том, что в ходе построения описания и связанного с этим выдвижения различных предположений и гипотез исследователь, начиная с некоторого момента, как правило, теряет представление об общих свойствах развиваемой им системы в целом. Окончательное описание является, так сказать, «локально продуманной» системой. Это означает, что исследователь может проанализировать и предсказать свойства ее ограниченных частей. Что же касается системы в целом, то ее поведение не может быть изучено без использования некоторых специальных средств. Как уже упоминалось ранее, эта особенность в общем случае может быть сформулирована в следующем виде: достаточно интересная гипотеза о сложной системе сама является сложной системой. Неизбежной поэтому является организация некоторого эмпирического исследования разработанной гипотезы. Для того чтобы это исследование стало возможным, необходимо представить гипотезу в виде такой действующей модели, которая может явиться непосредственным объектом экспериментального изучения. Решение задачи моделирования гипотезы составляет следующий, четвертый, этап работы. Прежде чем перейти к его описанию, остановимся еще на некоторых особенностях третьего этапа.

*«Разрывы» в описании.* Решая ту или иную конкретную задачу, человек, как правило, использует уже имеющийся у него опыт решения задач аналогичного типа. Это тем более справедливо, если испытуемым является специалист в определенной области. Такой специалист применяет при решении задачи сложные совокупности решающих правил, выработанных им в ходе практической деятельности, зачастую плохо сформулированных или даже неосознаваемых им. Часть этих правил находит явное выражение в действиях или высказываниях испытуемого при решении задачи и соответственно фиксируется в протоколе. Некоторые же правила не вербализуются, а определяют поведение человека, не будучи сами выражены в явной форме. В этих случаях при последующем анализе протоколов выявляются «разрывы» в описании ре-

шения задачи. Для заполнения таких «разрывов» используются различные приемы. Один из них состоит в следующем.

Сталкиваясь с «догадкой» испытуемого, со «скачком» в его рассуждениях, т. е. с «разрывом», исследователь заполняет его собственной догадкой, собственным эвристическим предположением. Этот шаг часто сопровождается замечаниями, например, такого типа: «испытуемый ведет себя так, будто решает такую-то систему уравнений». При этом не задается вопрос о том, что на самом деле делает испытуемый. В дальнейшем «такая-то система уравнений» включается в описание общей операционной структуры поведения и выступает в этом описании как очередная гипотеза, подлежащая проверке. Посмотрим, к чему может привести использование такого приема.

Если догадка исследователя оказалась удачной и блок, в который она включена, функционирует удовлетворительно при решении различных задач рассматриваемого класса, то эта догадка, естественно, включается в окончательный вариант описания. Если выдвинутая исследователем догадка окажется неудачной, то, как и в предыдущем случае, это выявится только при экспериментальном исследовании целостной модели гипотезы (описания). При плохом совпадении поведения модели с поведением испытуемого исследователю придется возвратиться к рассмотрению сделанного им необоснованного предположения и исследовать его более тщательно. Чрезвычайно важной поэтому является фиксация в ходе построения описания всех тех мест, где его элементы носят предположительный характер. Опасность состоит в том, что эвристические предположения исследователя могут оказаться незамеченными и незафиксированными им самим. В этом случае они могут стать таким источником ошибок, который очень трудно обнаружить в ходе дальнейшего исследования и который может привести к неудаче всей работы.

Другой прием «заполнения разрывов» связан с проведением направленных дополнительных экспериментов с испытуемым. Характер последних определяется спецификой рассматриваемой деятельности, однако общая феноменологическая ориентированность исследования в этом случае сохраняется. Универсальных рецептов организации таких экспериментов не существует, многое зависит здесь от находчивости и изобретательности исследователя. Приведем пример. При построении модели инвестиции было обнаружено, что многие решения по выбору ценных бумаг были сформулированы банковским служащим до начала работы над конкретной задачей, т. е. на основе имеющегося у него опыта. Естественно, эти решения не были отражены и в

протоколах. Для того чтобы выявить структуру таких решений, был использован следующий остроумный прием. Служащему предложили читать вслух статьи из выписываемой им специальной литературы и вслух же комментировать содержащиеся в них факты и мысли. Все высказывания служащего тщательно протоколировались. Анализ протоколов позволил выявить ряд важных решающих правил, лежащих в основе деятельности этого специалиста при решении им конкретных задач. Мы видим, таким образом, что «заполнение разрывов» было выполнено в этом случае на основе последовательного использования основной методики протоколирования.

С отказом от последовательного использования методики протоколирования связан еще один прием «заполнения разрывов». Столкнувшись с «разрывом», исследователь задает себе вопрос о том, почему человек в данных условиях выполнил данное действие. И ответ на это «почему» исследователь ищет в структуре внутренних, реализующихся в мозге человека, процессов переработки информации. Исследование таких процессов может, безусловно, привести к построению нужного описания и к заполнению «разрыва». Необходимо лишь иметь в виду, что оно предполагает переход на другой уровень, другой язык и другую методику исследования. В ряде случаев этот переход является целесообразным и приводит к хорошим результатам. Рассмотрение таких «комбинированных» работ представляет определенный интерес, и мы вернемся к нему впоследствии, обсудив более подробно особенности подходов, связанных с моделированием процессов и «механизмов» мышления человека.

**Моделирование гипотез.** Следующий этап построения автомата, который нам необходимо рассмотреть, связан с построением действующей модели гипотезы-описания, разработанной на основе анализа протоколов. Цель такого моделирования ясна из предыдущего обсуждения. Можно сказать, что если гипотеза представляет собой сложную систему взаимосвязанных высказываний и предположений, то модель гипотезы есть некоторая система, в которой автоматизирован вывод следствий из составляющих гипотезу совокупностей высказываний. Для того чтобы выявить специфику такого моделирования и разобраться в возникающих здесь трудностях, рассмотрим более подробно содержание работ, связанных с построением модели, и уточним смысл некоторых из используемых понятий.

Прежде всего отметим, что обсуждаемый прием — моделирование гипотез — рассматривается многими исследователями как необходимый элемент, дополняющий традиционную гипотетико-индуктивную схему исследований в тех случаях, когда она применяется для изучения сложных

систем. В рамках интересующей нас проблематики моделирование гипотез может осуществляться по двум различным схемам, особенности которых мы сейчас и рассмотрим.

*Концептуальные и действующие модели гипотез.* В настоящее время существуют различные подходы к определению понятия модели. Из множества возможных классификаций в дальнейшем будем использовать разделение моделей на статические (концептуальные) и динамические (действующие). В концептуальной модели основные свойства моделируемого объекта отражены с помощью совокупности высказываний в некотором определенном языке, содержащем необходимый и достаточный для данных целей набор понятий. Концептуальные модели могут строиться и с помощью слов естественного языка. Эти модели являются статическими в том смысле, что неспособны сами по себе изменять свои внутренние состояния и взаимодействовать с какими-либо внешними объектами. Легко видеть, что в рассматриваемом нами случае гипотеза относительно операционной структуры поведения человека, построенная на основе анализа протоколов, является концептуальной моделью.

Действующая модель является некоторой автономной системой, способной изменять собственные внутренние состояния или окружающую ее среду без непосредственного вмешательства человека. Действующие модели могут быть построены, например, в виде физических устройств — и тогда они способны взаимодействовать с объектами реального мира; в виде вычислительных систем — их поведение в этом случае связано с изменением условных сред, например с преобразованием числовых массивов. Будучи в достаточной степени автономной системой, действующая модель может явиться объектом наблюдения и эмпирического исследования. Именно поэтому и необходимо представление проверяемой гипотезы в виде действующей модели.

Таким образом, говоря о моделировании гипотезы, мы имеем в виду, по существу, построение действующей модели объекта на основе концептуальной модели этого же объекта.

Всегда ли возможно решение такой задачи? Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо более подробно рассмотреть понятия конструктивности описания.

*Конструктивность описания.* Понятие конструктивности в настоящее время определено недостаточно. Мы не будем здесь анализировать это понятие в полном объеме, а ограничимся лишь такой его содержательной интерпретацией, которая необходима для дальнейшего изложения.

Рассмотрим простой пример. Пусть некоторый математический объект $X$ описан выражением $a^2 - b^2$, причем известно, какие значения могут принимать $a$ и $b$. Объект $X$ для нас в данном случае полностью определен, поскольку

предполагается, что операции возведения в квадрат и вычитания мы выполнять умеем. Если будут предложены конкретные значения $a$ и $b$, то мы сможем определить значение $X$. Таким образом, описание $a^2 - b^2$ как бы содержит в себе инструкцию по выполнению действий, необходимых для определения $X$. Такое описание будем называть конструктивным. Пусть, далее, нам дано то же описание и требуется построить автомат, вычисляющий $X$ при некоторых $a$ и $b$. Если существуют автоматические устройства, выполняющие все необходимые операции (возведение в квадрат и т. п.), то искомый автомат мы построить сможем. Будем говорить, что и в этом случае описание $a^2 - b^2$ оказалось конструктивным. Здесь конструктивность описания зависела не от нашей способности выполнять нужные действия, а от наличия устройств, выполняющих их автоматически. Это указывает на важное свойство понятия конструктивности — его относительность.

Существенно также, что упоминавшиеся операции определены строго и недвусмысленно: мы знаем, например, что возвести данное число в квадрат можно единственным способом.

Таким образом, рассмотренное в примере описание содержит указания по выполнению определенных действий, операций. Существуют описания и другого рода, однако именно класс описаний, содержащих инструкции к действиям, является наиболее важным для нашего рассмотрения. В дальнейшем мы будем иметь в виду описания именно этого класса.

Для того чтобы более точно определить понятие конструктивности, рассмотрим некоторую систему операций $S$. Будем считать, что в $S$ входит конечное число операций и правила выполнения каждой из них зафиксированы. Назовем операции $S$ средствами реализации. Описание будет конструктивным относительно $S$ в том случае, если все входящие в него указания могут быть единственным образом выполнены с помощью операций, составляющих $S$.

Итак, решение задачи построения действующей модели объекта на основе его концептуальной модели-гипотезы возможно в том случае, если последняя представлена в виде описания, конструктивного относительно средств реализации модели. Выше упоминалось, что действующая модель объекта может быть построена с помощью различных средств. Те или иные конкретные средства моделирования определят и ту совокупность операций, которую сможет реализовать модель. Так, например, модель может быть построена в виде программы для ЦВМ с помощью определенного алгоритмического языка. В этом случае совокупность операций данного языка и составит имеющиеся в распоряжении исследова-

теля средства реализации. Так, для языка типа АЛГОЛ это будут операции безусловного и условного переходов, присваивания, вычисления в циклах и т. п. Если модель строится в виде электронного устройства, то средства реализации будут определены возможностями и характеристиками используемых элементов и блоков аппаратуры. Так, в них могут входить операции усиления, дифференцирования и т. п.

Таким образом, выбирая конкретный способ построения модели, мы определяем тем самым набор «изобразительных средств», совокупность конкретных операций, с помощью которых следует реализовать описание. Естественно, это возможно только в тех случаях, когда язык описания, его «изобразительные средства» определенным образом согласованы со средствами реализации действующей модели, когда возможен «перевод» одних в другие. Требование такой согласованности, «переводимости» мы и формулируем в виде требования конструктивности описания относительно средств моделирования.

Итак, мы можем уточнить обсуждаемую схему процесса построения моделей поведения, отметив следующую ее особенность. Исследователь, приступающий к составлению описания поведения испытуемого (п. 3 схемы), должен предварительно выбрать форму и технические средства построения действующей модели поведения и разработать описание в виде, конструктивном относительно избранных средств реализации.

В настоящее время наиболее распространено построение действующих моделей в виде программ для ЦВМ. Соответственно и описания поведения строятся в виде, удобном для их последующей алгоритмизации. Как правило, уже на начальных этапах составления описаний исследователи широко применяют представления и язык, ориентированные на последующее использование вычислительных машин. Этот подход хорошо иллюстрирует уже цитированная нами работа по построению модели процесса доверительной инвестиции. Описание здесь строится в виде набора блок-схем, характеризующих процессы оперирования с имеющимися в некоторой памяти информационными списками, и процессы выбора определенных решающих правил с помощью фиксированного набора инструкций. На основе блок-схемного описания строится программа для ЦВМ.

С широким использованием языка вычислительных машин связано также то обстоятельство, что, анализируя деятельность человека, современный исследователь видит в ней прежде всего операции запоминания и выборки, преобразования списков, поиска нужной информации и т. п. Вычислительные машины действительно являются высокоэффективным средством моделирования, и с их помощью осуществлен

значительный прогресс в рассматриваемой нами области ИР. Определенная опасность существует, однако, в связи с тем, что, ориентируясь на использование ЦВМ, исследователи зачастую сознательно или неосознанно сужают круг используемых ими представлений и, как следствие, обнаруживают в деятельности человека прежде всего то, что легко и удобно представить с помощью существующих вычислительных средств. В отношении ряда задач такой подход может оказаться неэффективным и даже задержать развитие исследований, как это произошло, например, при поиске методов сокращения полного перебора вариантов (а идея перебора явно «подсказана» способом организации информационных процессов в машинах) при решении задач типа шахматных. Существующие методы построения действующих вычислительных моделей зачастую оказываются неэффективными и в тех случаях, когда решение задачи требует одновременной переработки информации сразу по многим каналам. Таким образом, в каждом конкретном случае выбор способа построения действующей модели и, следовательно, языка описания объекта является весьма ответственным этапом, и принятие решения здесь должно основываться на тщательном анализе специфики решаемой задачи.

Требование конструктивности описания на практике удается выполнить далеко не всегда. В связи со сложностью исследуемого поведения описание часто содержит фрагменты, заданные неконструктивно. Это приводит к тому, что на основе данного описания может быть построена не единственная действующая модель. В самом деле, сталкиваясь с неконструктивным фрагментом, исследователь вынужден каким-то образом ликвидировать имеющиеся в нем неопределенности для того, чтобы продолжать работу. При этом он выдвигает дополнительные предположения, упрощает описание и т. п. Как правило, эти операции можно выполнить различными способами. В зависимости от способа действующая модель будет реализована по-разному. Рассматриваемая ситуация в определенном смысле аналогична «заполнению разрывов» в описании. Так же, как и при «заполнении разрывов», введение новых предположений и упрощений может оказаться удачным в большей или меньшей степени, что может быть выявлено на этапе исследования поведения модели. Как и раньше, чрезвычайно важной является тщательная фиксация всех принимаемых эвристических предположений с тем, чтобы в случае необходимости можно было вернуться к их более подробному рассмотрению и коррекции.

Итак, мы рассмотрели некоторые особенности четвертого этапа исследований, связанного с построением действующих моделей гипотез. Заметим, что термин «моделирование гипотезы» в данном контексте, вообще говоря, не корректен. По-

нятие моделирования является более широким и содержательным, чем процедуры, составляющие описанный этап. Возможно, точнее было бы говорить о специфичных преобразованиях, даже о перекодировании моделей-гипотез. Учитывая, однако, определенное удобство и достаточную распространенность этого термина, мы и в дальнейшем будем использовать выражение «моделирование гипотезы», обозначая им процессы построения действующей модели объекта на основе его концептуальной, статической модели гипотезы.

**Исследование моделей.** Рассмотрим наконец последний, пятый, этап построения модели поведения, связанный с экспериментальным исследованием разработанной действующей модели гипотезы. Основная задача этого этапа состоит в том, чтобы убедиться в пригодности модели для решения поставленной перед ней задачи. Ответ на этот вопрос можно получить, подавая на входы модели различные совокупности исходных данных и наблюдая ее выходные реакции. Мы не будем останавливаться на обсуждении особенностей этого процесса, поскольку он в значительной мере определяется спецификой решаемых задач.

Если поведение модели удовлетворяет предъявляемым требованиям, то ее построение можно считать законченным, и дальнейшая судьба модели определяется способами ее практической эксплуатации. Иначе говоря, с этого момента модель может рассматриваться как автомат, способный выполнять определенные функции человека, что и являлось конечной целью предпринятой разработки. Такая формулировка цели, как уже не раз указывалось, характерна для работ в области ИР.

На практике, однако, редко случается, чтобы исследование модели показало ее абсолютную непригодность или, наоборот, идеальное соответствие требованиям. Чаще всего исследователь обнаруживает, что в некоторых ситуациях модель оказывается не в состоянии найти нужное решение или вырабатываемое решение не удовлетворяет введенным заранее критериям. Обнаружение таких недостатков вынуждает исследователя вернуться к рассмотрению выполненных этапов работы в поисках возможных источников ошибок. Кратко рассмотрим основные приемы такого поиска.

*Локализация ошибки.* Для сложных моделей решение задачи локализации ошибки часто связано с существенными трудностями. В отдельных случаях удается локализовать ошибку только на основе тщательного анализа характера нарушений в работе модели. Более общим приемом является сравнение поведения модели с поведением человека, зафиксированным в протоколах. Сопоставляя последовательности действий человека и модели, можно определить момент, когда эти последовательности «расходятся», т. е. модель

выбирает действие, отличное от выполненного человеком. Анализ причин такого «расхождения» может привести к обнаружению искомой ошибки.

Однако не всегда факт «расхождения» свидетельствует о наличии ошибки в модели. Это бывает в тех случаях, когда ситуация допускает несколько равноценных решений и действие модели является «оправданным», несмотря на его отличие от соответствующего действия человека. В качестве примера такой ситуации укажем на случай, когда в связи с отсутствием нужной информации или по характеру задачи на некотором этапе человек и машина используют стратегии случайного поиска. Совпадение решений здесь весьма маловероятно, однако действие модели оказывается правомерным.

Понятно, что возникшее в некоторый момент расхождение может привести к еще большим расхождениям в последующие моменты. В ходе решения задачи различия могут накапливаться, так что через некоторое время сравнение становится невозможным. Для того чтобы продолжить поиск ошибки, целесообразно использовать стратегию «возвращения модели на шаг назад» [62, стр. 279]. В нашем случае эта стратегия состоит в следующем. Сравниваются последовательные действия человека и модели. При обнаружении их расхождения проводится анализ его причин. При этом либо выявляется ошибка в модели, либо действие модели признается правомерным. В последнем случае восстанавливается состояние модели, предшествовавшее выбору данного действия, и в него вносятся изменения таким образом, чтобы модель выполнила другое действие, соответствующее действию человека. Затем сравнение продолжается. Необходимо отметить, что реализация описанной стратегии может потребовать изменения большого числа параметров модели и всегда связана с выполнением достаточно сложных информационных преобразований. Поэтому ее использование целесообразно планировать заранее, с тем, чтобы «встраивать» в модель необходимые управляющие устройства.

*Критерии сравнения.* Особые проблемы связаны также с выбором критериев для сравнения поведения человека и модели. В самом деле, значительная часть протоколов, фиксирующих деятельность человека, представляет собой запись его словесных высказываний, в то время как модели — в общем случае — не содержат механизмов, имитирующих вербальное поведение. Кроме того, в ходе решения задач человек зачастую выполняет действия, не связанные непосредственно с поиском решения, а также действия, воспроизведение которых в модели по тем или иным причинам нецелесообразно (например, характеризующиеся явной избыточностью или неоптимальностью). Протокол, таким образом, содержит «сырой» материал, использование которого для

сравнения предполагает некоторую обработку. Для выполнения такой обработки и необходимо четко сформулировать критерии сравнения, а также заранее зафиксировать конечный набор правил интерпретации протокольных записей.

Конкретный вид критериев и правил интерпретации определяется исходя из целей исследования в каждом отдельном случае. Так, например, при построении модели инвестиции использован критерий конечного результата; в работе [33, стр. 382] приведены данные по сравнению результатов выбора портфелей ценных бумаг, произведенного инвестором и его моделью в реальных условиях. В работе [41] также приведен пример сравнения последовательности действий человека и модели.

*Коррекция моделей.* Для того чтобы обнаружить и исправить ошибку, исследователю необходимо возвратиться к более тщательному рассмотрению и проверке обоснованности допущений и предположений, принятых им в ходе конструирования данного блока. Возвратившись к рассмотрению соответствующего этапа, исследователь может исправить обнаруженную ошибку, внеся необходимые изменения. При этом ему придется в дальнейшем «провести» сделанное изменение через все последующие этапы моделирования.

В ряде случаев при «доводке» модели выясняется, что информации, собранной в ходе экспериментов с человеком, недостаточно для успешного решения задачи. Это вызывает постановку новых экспериментов, пополнение протоколов и соответствующую коррекцию гипотезы и модели. Отметим, что использование описанных циклов является характерным для всех методов, основанных в той или иной степени на использовании эвристических предположений. Некоторые авторы, публикуя полученные ими результаты в окончательном виде, избегают описания этих циклических процессов «доводки», в то время как последние часто составляют значительную часть проделанной работы, а их описание и обсуждение возникающих здесь специфических трудностей могут явиться весьма поучительными.

**Обсуждение.** Мы обсудили, таким образом, ряд особенностей процесса построения одного типа моделей, которые в дальнейшем будем условно называть просто моделями поведения. То обстоятельство, что этому (далеко не исчерпывающему) обсуждению уделено сравнительно большое внимание, объясняется прежде всего типичностью используемой здесь схемы для широкого круга исследований в области искусственного разума. В дальнейшем, сталкиваясь с подобными схемами, будем пользоваться введенными понятиями и представлениями, не уделяя больше времени их подробному описанию. В большинстве случаев приведенные выше комментарии к отдельным этапам процесса построения

моделей поведения с очевидными изменениями приложимы и к этапам построения моделей другого рода, а именно — моделей «процессов» и моделей «механизмов».

Прежде чем продолжить изложение, сделаем еще одно важное замечание. Все, что было сказано выше о процессе построения действующих моделей поведения человека, явилось результатом рассмотрения этой задачи со вполне определенной и ограниченной точки зрения, а именно — точки зрения разработчиков систем искусственного разума. Предполагалось, иначе говоря, что целью работы является построение системы, поведение которой в конечном счете должно быть функционально эквивалентным поведению человека при решении определенных задач. Именно такое требование, как указывалось ранее, является необходимым, чтобы обеспечить возможность использования модели в целях автоматизации.

Необходимо отметить, что аналогичные схемы исследований широко используются также для решения задач познавательного характера, когда действующая модель рассматривается как теория соответствующего поведения человека и строится как таковая. В этом случае описанный процесс имеет ряд особенностей, на обсуждении которых мы не останавливались.

Правильное понимание указанного различия необходимо при оценке конкретных исследований. Это тем более важно, что часто приходится иметь дело с исследованиями смешанного характера: автор, разработавший достаточно интересную познавательную модель, в редких случаях удерживается от соблазна обсудить ее применимость в практических целях, и, наоборот, разработчик системы, автоматизирующей решение достаточно сложных «человеческих» задач, нередко представляет ее и как модель процессов, реально выполняемых человеком. Все это создает иногда почву для различного рода малоэффективных дискуссий относительно «соотношения решения задач человеком и машиной», примеры которых можно найти в литературе по психологии.

## § 2. *Модели процессов переработки информации*

Для решения некоторых задач автоматизации изучение и имитация внешнего, наблюдаемого, поведения человека недостаточны. В этих случаях может оказаться эффективным подход, основанный на изучении и воспроизведении процессов переработки информации, реализуемых мозгом человека и лежащих в основе различных форм внешнего поведения. В рамках этого подхода выполнен ряд интересных работ. Остановимся на рассмотрении типичной для данного случая схемы проведения исследований.

1. Пусть нам необходимо построить автомат для решения определенных задач при условии, что применение традиционных методов синтеза и построения моделей поведения либо невозможно, либо неэффективно. Пусть также известно, что люди справляются с решением интересующих нас задач. В соответствии со спецификой этих задач зададим критерии функциональной эквивалентности поведений человека и искомого автомата.

2. Организуем наблюдение за поведением человека, решающего задачу в определенной контролируемой ситуации, и будем фиксировать в протоколах производимые им действия и словесные высказывания. Пусть в нашем распоряжении имеются также некоторые заимствованные из психологии сведения о внутренних информационных процессах, реализуемых мозгом в ходе рассматриваемой нами деятельности.

3. На основе анализа протоколов и имеющихся данных психологии попытаемся описать систему операций по переработке информации человеком.

4. В соответствии с полученным описанием построим некоторое устройство, реализующее соответствующую систему операций. Будем полагать, что такое устройство и является искомым автоматом.

5. Исследуем поведение автомата при решении интересующих нас задач. Если поведение автомата недостаточно полно (по отношению к принятым критериям) соответствует поведению человека или по каким-либо другим причинам не является удовлетворительным, будем возвращаться к пп. 2, 3 или 4, внося необходимые изменения и добиваясь соответствия поведения автомата предъявляемым требованиям.

Нетрудно заметить, что описанная схема имеет много общего со схемой построения моделей поведения. Однако имеются два существенных и связанных друг с другом отличия. Первое состоит в том, что изменена задача: гипотеза п. 3 описывает уже не внешние, наблюдаемые, а внутренние, скрытые, процессы и операции. Соответственно возникает и второе различие: описание строится не только на основе сведений о том, что делает человек, но и используются данные о том, почему он поступает так или иначе.

В соответствии с указанными особенностями меняется характер отдельных этапов исследования. Так, на втором этапе в протокол заносятся все комментарии и пояснения испытуемого по поводу применяемых им решений, а также описания ощущений и состояний, возникающих у него в ходе решения задачи. Зачастую инструкции и дополнительные вопросы испытуемому формулируются таким образом, чтобы стимулировать его интроспективные описания и высказывания. Применяются также специальные виды анкет и

опросников. Полученный таким образом материал может быть осмыслен и использован исследователем только в контексте какой-либо психологической теории или концепции. Использование психологических теорий является характерной чертой обсуждаемого подхода. Это, однако, не уменьшает роли объективного описания внешних, наблюдаемых, действий испытуемого. Роль такого описания состоит в том, что оно по-прежнему определяет, что именно должен делать конструируемый автомат. Пояснение же испытуемого и психологические сведения должны оказать помощь в ответе на вопрос о том, как такой автомат построить.

Весьма существенным в описываемых условиях является то обстоятельство, что предлагаемые в психологии гипотезы и теоретические обобщения носят, как правило, характер словесных описаний. Это означает, что относительно задачи построения описания (п. 3) такие сведения могут дать лишь некоторую общую идею, определить основное направление работы. Что же касается собственно составления описания в конструктивной форме, то оно является в этом случае результатом целого ряда эвристических преобразований исходного материала и носит сугубо гипотетический характер. Так обстоит дело, если объектом автоматизации являются сложные, плохо поддающиеся инструментальному исследованию формы поведения. В тех же случаях, когда изучению подвергаются сравнительно узкие, ограниченные классы реакций, оказывается целесообразным проведение специальных психологических экспериментов, направленных на уточнение тех или иных частных предположений. Однако специфика психических процессов такова, что в организации даже сравнительно простых функций участвуют зачастую весьма сложные и разветвленные процессы, так что возможность экспериментального подтверждения частных предположений представляется исследователю весьма редко. В большинстве случаев это оказывается осуществимым для некоторых видов перцептивных процессов и отдельных «элементарных» психических феноменов (внимания, памяти и др.). В общем же случае результатом работы на третьем этапе исследований является выдвижение гипотезы, обоснованной лишь самым приблизительным образом. Проверка же ее правомерности проводится уже на этапе исследования действующей модели.

Наиболее распространенный способ реализации действующих моделей в настоящее время — это представление в виде программ для ЦВМ. Поэтому конструктивным языком описания гипотез, используемых на практике, является язык «элементарных» информационных процессов, которые естественно реализуются в вычислительных машинах. Машинное представление гипотез оказывается, как уже упоминалось, эффективным методом проверки их правомерности. Поэтому

рассматриваемая схема исследований нашла широкое применение в области психологии, где она используется для работы с гипотезами объяснительного характера, т. е. при решении познавательных задач.

Здесь возникает ряд интересных вопросов, связанных с оценкой правомерности и перспективности применения информационного подхода в психологических исследованиях. Отметим, что большинство моделей, созданных для решения психологических проблем, могут быть эффективно использованы при автоматизации соответствующих (большей частью интеллектуальных) функций человека. В самом деле, чтобы приступить к оценке и обсуждению своей гипотезы, психолог вынужден доказать предварительно ее правомерность, т. е. исследовать действующую модель и убедиться в совпадении ее поведения с поведением испытуемых, выполнив тем самым условия, достаточные для отнесения этой модели к классу моделей ИР.

Мы не будем более подробно останавливаться на рассмотрении специфики моделирования информационных процессов мозга. В данном случае оказывается справедливым (с очевидными изменениями) целый ряд замечаний, сделанных нами в предыдущем разделе. Кроме того, обсуждаемый подход широко комментируется в психологической литературе [40, 51]. В качестве примера, характерного для этого подхода, можно привести работу Ньюэлла, Саймона и Шоу, посвященную моделированию человеческого мышления в ходе решения задач. Содержание и результаты этой работы подробно описаны в ряде публикаций (см., например, [41]).

## § 3. *Модели „механизмов" переработки информации*

Рассмотрим подход, связанный с построением автоматов, имитирующих человеческую деятельность путем воспроизведения принципов работы отдельных образований коры головного мозга человека. Многие авторы характеризуют этот подход как моделирование «механизмов» мозга и связывают его с модельным представлением отдельных нервных клеток и их совокупностей, а также работы различных отделов мозга и их взаимодействий.

Использовать термин «механизмы» в данном контексте можно, очевидно, только условно. Хорошо известно, что описание любого сложного объекта может быть выполнено на разных уровнях детализации. В иерархической системе таких разноуровневых описаний (каждое из которых может явиться адекватной моделью объекта) термином «механизм» может быть охарактеризовано любое описание, рассматриваемое в отношении к описанию более высокого уровня. Так,

например, информационные процессы, протекающие в мозге, можно понимать как механизмы, порождающие внешнее, наблюдаемое, поведение. По отношению же к этим информационным процессам механизмами являются совокупности операций (опять-таки информационных), реализуемых в процессе жизнедеятельности отдельных нервных клеток. Таким образом, закрепляя за рассматриваемым подходом название «моделирование механизмов», мы делаем это условно и фиксируем в таком названии различие, состоящее в том, что в рамках этого подхода рассматриваются не процессы переработки информации, реализуемые мозгом как некоторой целостной системой, а другие по своей природе и структуре информационные процессы — те, которые реализуются отдельными структурными или функциональными единицами мозга. Иными словами, названием «моделирование механизмов» мы фиксируем определенный уровень информационного описания, а именно — нейрофизиологический.

Большое количество работ по моделированию механизмов мозга посвящено построению машинных и физических аналогов нейронных структур. С точки зрения задач искусственного разума упомянутые работы не привели к каким-либо существенным результатам. Несмотря на то что удалось создать устройства, по ряду важных свойств достаточно близкие к естественным нейронам, пока не удается построить из них нервную сеть с достаточно богатым и интересным поведением.

В рамках направления, заложенного работами Мак-Каллоха и Питтса, построены [22] алгоритмы синтеза нейронных сетей, способные надежно реализовывать некоторые задаваемые заранее логические операции. Однако значение этих результатов не следует переоценивать, поскольку, во-первых, объем сетей, синтезируемых с помощью этих алгоритмов, невелик и, во-вторых, описание с помощью логических функций достаточно сложного поведения является трудно разрешимой (если не безнадежной) задачей. В то же время представляют значительный интерес проводимые в этом направлении исследования по построению надежных устройств из ненадежных элементов. Развитые здесь приемы могут быть использованы при конструировании отдельных звеньев устройств автоматизации.

Пороговые элементы Мак-Каллоха и Питтса весьма упрощенно и схематично отображают свойства реального нейрона. Эта простота, по-видимому, и обеспечила успех в решении задач синтеза сетей из таких элементов. Что касается более сложных и адекватных моделей нервных клеток, то строгие методы решения аналогичных задач для этого случая не найдены. Разработка этих методов связана с существенными трудностями, обусловленными отсутствием подхо-

дящих средств формального описания и математического анализа сетевых структур большой сложности. Некоторые надежды в связи с попыткой «обойти» эти трудности возлагались на непосредственное изучение естественных нейронных сетей с целью выявления основных принципов их организации экспериментальным путем. Если бы такие принципы удалось установить, то использование их при конструировании сетей из искусственных нейронов было бы чисто механической задачей. В последнее время стало ясно, что и этот путь не является перспективным, и основным результатом предпринятых в этом направлении попыток было осознание огромной сложности нейронной организации мозга, справиться с которой существующими методами и техническими средствами нейрофизиологии оказалось невозможным.

В связи с таким положением в области ИР, занимающейся моделированием нейронных сетей, создалась кризисная ситуация. Она характеризуется тем, что, с одной стороны, имеется возможность весьма полно отображать в технических устройствах свойства нервных клеток, а с другой — отсутствуют способы использования этих точных моделей для решения технических задач. Можно полагать, что основная причина сложившейся ситуации заключается в том, что уровень нейронного описания мозга оказывается не подходящим для анализа реализуемых им информационных процессов. Иными словами, нейрон не является функциональной единицей мозга как системы, обеспечивающей сложную приспособительную деятельность человека. Именно поэтому и не удается связать процессы, реализуемые отдельными нейронами, с процессами и актами поведения, воспроизведение которых является конечной целью исследований в области ИР. Конкретные трудности, в которых выражается упомянутый разрыв, состоят прежде всего в невозможности систематического (содержательного относительно конечных форм поведения) анализа развивающихся в нейронных сетях процессов, а также в невозможности разумной предварительной организации нейронной сети. Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку в настоящее время уже ясно, что наиболее перспективным путем моделирования сложного поведения является создание самообучающихся и самоорганизующихся систем, а успех их использования необходимо связан с некоторой начальной, предварительной, обученностью и организацией.

Необходимо отметить, однако, что в обширной области моделирования мозга существует класс задач, при решении которых использование нейронного уровня описания является целесообразным и эффективным. Эти задачи связаны с представлением в технических системах процессов узнава-

ния образов и их классификации. Речь при этом идет не о моделировании упомянутых процессов в их полном объеме, а лишь о той их части и о тех их звеньях, которые реализуются в мозге работой анализаторных систем, прежде всего — зрительной и слуховой. Специфика анализаторных систем состоит в том, что они представлены жесткими нейронными структурами, обучение в которых практически отсутствует. Кроме того, эти структуры являются в значительной степени регулярными. Все это делает анализаторные системы удобным объектом экспериментального нейрофизиологического исследования, и здесь мы сталкиваемся именно с тем случаем, когда прямое изучение нейронных структур приводит к уяснению хотя бы основных принципов их организации. Использование этих принципов при решении технических задач осуществляется двумя путями. В некоторых случаях предпринимаются попытки применять их для создания искусственных анализаторов, чаще же они играют эвристическую роль. Такого рода исследования составляют в настоящее время основное (по крайней мере, по объему) содержание работ в области нейробионики. Здесь получены интересные результаты прикладного характера. Однако ряд важных задач, связанных с распознаванием и классификацией объектов, описываемых сложными совокупностями признаков, еще не находят своего решения. Трудности здесь связаны с представлением таких процессов, реализация которых в нервной системе человека проходит с участием ее высших отделов и, следовательно, описание которых на нейронном уровне оказывается неэффективным.

Можно сказать, таким образом, что «нейронный» этап в развитии ИР в целом завершен и дальнейшее направление работ по моделированию механизмов мозга связано с переходом на другой, более удобный, уровень описания. Мы полагаем, что такой переход обусловливает рассмотрение в качестве функциональной единицы мозга не отдельную нервную клетку, а их специфическую совокупность — нейронный ансамбль.

Представления о нейронном ансамбле и его роли в функционировании мозга впервые были сформулированы в 1949 г. О. Хеббом [77], а в дальнейшем уточнены и развиты его последователями [30, 54, 80, 82]. В настоящее время проводится исследование функциональных свойств нейронных ансамблей методами нейрофизиологии [30].

Мы полагаем, что использование представлений о нейронных ансамблях при моделировании механизмов мозга является наиболее перспективным направлением в рассматриваемой области исследований. Кроме работ, выполненных на нейронном уровне, а также основанных на представлении о более крупных функциональных единицах мозга —

нейронных ансамблях, к направлению, связанному с моделированием механизмов мозга, должны быть отнесены разработки, эвристической основой для которых служит изучение и анализ процессов организации интегративной деятельности мозга в ходе взаимодействия тех или иных его подсистем (ретикулярной формации, коры больших полушарий, ядер гиппокампа и т. п.) [23, 32, 54, 65 и др.].

В самом общем виде схема проведения исследований при построении моделей механизмов мозга весьма близка к описанным ранее схемам построения моделей поведения и моделей процессов. Мы не будем поэтому выписывать ее еще раз, а ограничимся лишь кратким обсуждением возникающих здесь особенностей.

В описываемом случае исходный материал для построения модели составляют: зафиксированные в протоколах наблюдения за поведением человека при решении интересующей нас задачи; заимствованные из психологии сведения о внутренних процессах переработки информации в ходе решения; заимствованные из нейрофизиологии и физиологии мозга сведения о структуре и правилах функционирования механизмов мозга. В общем случае имеющиеся сведения являются неполными, приближенными, и в ходе построения модели могут проводиться экспериментальные исследования, направленные на их дополнение.

Сведения о поведении, процессах и механизмах используются в ходе работы по-разному: данные о внешних, наблюдаемых, реакциях испытуемого и о реализуемых им информационных процессах определяют соответственно, *что* именно должна делать модель и какие именно внутренние процессы желательно для этого обеспечить; данные же о структуре и функционировании физиологических образований мозга подсказывают ответ на вопрос о том, *как*, в каком именно виде строить модель. Таким образом, гипотеза, формирование которой составляет содержание третьего этапа исследования, является в данном случае гипотезой относительно работы механизмов мозга. Проверка этой гипотезы осуществляется, как и раньше, сравнением внешнего поведения модели с поведением человека. По возможности полное воспроизведение последнего является, как и в предыдущих случаях, конечной целью исследования.

Нетрудно заметить, что обсуждаемый метод предполагает наибольшее (по сравнению с остальными) «расстояние» между исходной гипотезой и конечной целью: мы должны конструктивно определить такие механизмы, которые обеспечивали бы протекание в модели процессов, приводящих к нужным внешним реакциям.

Преимущество такого подхода заключается в том, что в иерархической системе описаний любого объекта обычно

соблюдается своеобразное «правило воронки»: чем ниже уровень описания, тем больший объем феноменов может быть получен или объяснен. Так, если бы нам удалось точно воспроизвести физику и химизм (т. е. «механизмы») клеточного аппарата наследственности, то со временем мы, вероятно, воспроизвели бы и весь состоящий из клеток организм. Соответственно, представив в модели механизмы некоторого наблюдаемого поведения, мы скорее всего получим модель, воспроизводящую более широкий круг поведенческих реакций, чем тот, для воспроизведения которого модель строилась. Отсюда следует еще одна особенность обсуждаемого метода: его применение может быть рекомендовано в тех случаях, когда объем автоматизируемых поведенческих реакций достаточно велик и логика этих реакций настолько сложна, что применение первых двух более простых подходов не приводит к успеху.

Описываемая схема проведения исследований широко используется также при решении задач познавательного характера, т. е. задач психологии и нейрофизиологии.

Следует отметить, что при решении некоторых задач частного характера описываемая схема применяется в неполном виде. Это происходит в тех случаях, когда целью исследования является воспроизведение в технических устройствах не тех или иных наблюдаемых форм поведения, а некоторых промежуточных процессов, реализуемых человеческим мозгом. Приведем пример. Известно, что одним из свойств памяти человека является ассоциативность запоминания и выборки. Было бы очень удобно, если бы этим свойством обладали и вычислительные машины. Целесообразно, следовательно, организовать изучение механизмов ассоциативного запоминания с тем, чтобы впоследствии использовать их модели в конструировании ЦВМ. Работы в этом направлении действительно проводятся. Видно, таким образом, что в данном случае целью моделирования механизмов мозга является воспроизведение не конкретных поведенческих актов, а процесса запоминания и выборки информации.

В качестве языка, на котором формулируются гипотезы о механизмах мозга, часто используются языки, ориентированные на последующее применение ЦВМ. Однако при использовании описываемого подхода недостатки машин, связанные с последовательным способом их работы, проявляются в наибольшей мере. Хорошо известно, что эффективность мозга как информационного устройства основана в значительной степени на способности его механизмов производить переработку информации параллельно по множеству каналов. Воспроизведение в ЦВМ этих же процессов требует «вытягивания в цепочку» операций, реализуемых мозгом одновременно, и связано с непроизводительным использованием

ресурсов памяти машин и большими затратами машинного времени.

Более адекватными средствами реализации действующих моделей механизмов мозга являются аналоговые вычислительные машины и особенно — специализированные физические устройства. Перспективны также аналого-цифровые комплексы. Использование параллельной техники предъявляет, очевидно, соответствующие специфические требования и к конструктивному языку изложения гипотез.

## § 4. *Общая схема моделирования*

Мы рассмотрели три различных подхода к решению задач автоматизации сложного поведения человека. Каждый из них связан с построением некоторых информационных систем, выступающих в одном случае как модели внешнего, наблюдаемого, поведения; в другом — как модели процессов переработки информации, реализуемых мозгом в ходе его интегративной деятельности; в третьем — как модели «механизмов» мозга. В сущности, модели всех трех типов представляют собой разноуровневые описания единого объекта — человека, решающего задачи.

Все перечисленные подходы связаны с проведением исследований по некоторой схеме. Каждая из схем предусматривает: выдвижение гипотез, описывающих объект на том или ином фиксированном уровне; последующее представление этих гипотез в виде действующих моделей, назначение которых состоит в автоматизации выводов; сравнение этих выводов, т. е. поведения модели, с реально наблюдаемым поведением человека. Предполагается «циклический» характер исследования: после проведения операций сравнения поведения модели с поведением человека и выявления имеющихся различий либо осуществляется повторное обращение к исследованию объекта, либо производится коррекция исходной гипотезы, либо совершенствуется действующая модель — и исследование повторяется начиная с места возврата. Выполнение подобных циклов обеспечивает процесс последовательного приближения модели к такому виду, при котором она удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям.

Еще раз укажем основные особенности каждого из подходов.

Подход, связанный с разработкой моделей поведения, предполагает использование в качестве исходной информации только тех данных, которые зафиксированы в протоколах наблюдений за действиями испытуемого. Гипотеза в этом случае описывает систему операций по преобразованию

исходной ситуации к нужному виду. При построении гипотезы и ее модели, кроме эвристических предположений и приемов, по возможности используются данные из областей, специально исследующих структуру и принципы организации моделируемых видов деятельности. К разрабатываемым моделям предъявляется только одно требование: в ходе решения задачи модель должна делать то же, что и человек, находящийся в аналогичных условиях.

Подход, связанный с разработкой моделей процессов, предполагает использование в качестве исходной информации как протоколов, так и имеющихся в психологии (как правило, неполных) данных относительно структуры внутренних информационных процессов, реализуемых мозгом в ходе решения задач изучаемого типа. Гипотеза здесь описывает именно эти внутренние процессы. Эвристической основой гипотезы служат аналогии с процессами, протекающими в живом мозге. Однако представленные в гипотезе и ее модели принципы и схемы организации информационных процессов не «приписываются» мозгу, т. е. не ставится вопрос относительно их истинности. В данном случае требуется только, чтобы гипотеза удовлетворительно объясняла наблюдаемую феноменологию поведения, т. е. являлась правомерной. Если же в рамках какого-либо исследования предполагается проверка истинности гипотезы, то это накладывает на процесс ее построения целый ряд ограничений, связанных с необходимостью описать тот единственный вариант изучаемых процессов, который на самом деле реализуется в мозге. Такое исследование, очевидно, не принадлежит уже к области ИР, точнее, не является характерным для этой области и с бóльшим основанием должно быть рассмотрено в рамках другой проблемы — моделирования психических функций. Таким образом, модели, разрабатываемые с помощью данного подхода, должны давать в результате один из возможных вариантов ответа на вопрос о том, как формируется поведение человека в ходе решения рассматриваемой задачи.

Подход, связанный с разработкой моделей механизмов, предполагает использование в качестве исходной информации как данных протоколов, так и имеющихся в психологии и нейрофизиологии (как правило, неполных) данных относительно структуры реализуемых мозгом внутренних информационных процессов и относительно тех естественных механизмов, функционированием которых эти процессы порождаются. Здесь гипотеза описывает именно функционирование механизмов мозга, взятое в его информационном аспекте. В связи с недостаточной изученностью механизмов мозга при построении гипотезы имеют большую эвристическую ценность сведения об информационных процессах и

структуре внешнего поведения. Так, если из психологии известны, например, некоторые особенности процесса запоминания, то необходимо либо предусмотреть специальные механизмы, реализующие эти особенности в модели, либо убедиться в том, что они будут представлены в работе уже введенных ранее механизмов, обеспечивающих выполнение моделью других функций. Однако при проверке гипотезы нет принципиальной необходимости устанавливать, действительно ли модель реализует те или иные промежуточные процессы. Основным, как обычно, является соответствие поведений человека и модели. Сопоставление же протекающих в модели процессов с внутренними информационными процессами мозга имеет в данном случае вспомогательный характер и может оказаться полезным при поиске причин несоответствий в поведении модели и человека.

Итак, мы рассмотрели подходы, характерные для исследований в области ИР. Следует отметить, что в ходе рассмотрения был использован ряд упрощений и в целом оно носит несколько абстрактный характер. Именно это позволило нам более или менее четко выделить схемы исследований, характерные для различных подходов. Схемы такого рода, хоть и упрощенные, являются тем не менее удобным и эффективным инструментом при анализе практических работ по моделированию разумного поведения, а также при оценке места и значения получаемых в ходе таких работ конкретных результатов. Мы полагаем, кроме того, что ясное понимание особенностей принципиальной структуры исследования необходимо при планировании и организации новых работ в области ИР.

Среди множества конкретных работ по искусственному разуму, описания которых опубликованы за последнее десятилетие, сравнительно немногие выполнены в строгом соответствии с какой-либо одной из описанных выше схем. Однако почти в каждой из работ можно обнаружить отдельные фрагменты той или иной схемы, их разные комбинации и т. п. Таким образом, оказывается, что в рамках одного исследования зачастую используются и определенным образом совмещаются несколько разных подходов. Кроме того, существуют исследования, применяющие тот или иной подход только частично, иногда в неполной или неявной форме. В соответствии со способом использования различных схем практические работы по моделированию сложных функций человека можно разделить на несколько больших групп. Для того чтобы завершить рассмотрение интересующей нас проблемы, кратко опишем основные, наиболее представительные группы работ. Мы выделяем три такие группы, условно названные исследованиями смешанного типа, исследованиями по редуцированной схеме и исследованиями больших гипотез.

Для работ, составляющих эту группу, характерно совмещение в рамках одного исследования нескольких разноуровневых подходов к описанию объекта моделирования. Возможность такого совмещения заложена в структуре схем, описывающих каждый из основных подходов. Приведем примеры.

Пусть исследование в целом выполняется по схеме моделирования наблюдаемого поведения. При обсуждении этой схемы мы упоминали, что при анализе протоколов часто возникают трудности, связанные с наличием «скачков» в ходе решения задач испытуемым. При построении описания гипотезы в соответствующих местах появляются логические разрывы, «закрытие» которых всякий раз требует специального рассмотрения и дополнительных исследований. Ясно, что такие дополнительные исследования могут проводиться по схеме моделирования процессов или даже механизмов. Если эти схемы действительно использованы, то в окончательном виде гипотеза будет содержать разноуровневые описания объекта. Иначе говоря, большая часть описания будет отображать структуру наблюдаемых поведенческих актов, а отдельные его фрагменты — структуру, например, внутренних информационных процессов мозга. Возможно и обратное. Пусть в модели внутренних процессов функции некоторых блоков сводятся к выполнению сравнительно простых операций, структура которых легко формализуется. В этом случае удобно заменить такие блоки более простыми описаниями, эквивалентными им уже на более высоком, поведенческом, уровне.

В качестве примера работы смешанного типа можно рассмотреть исследование У. Рейтмана процесса решения человеком задач «на аналогию» [54]. Построенная автором модель «Аргус» состоит из двух основных частей. Одна из них выполнена в виде «активной семантической сети», отображающей некоторую гипотезу относительно свойств хеббовских клеточных ансамблей и их взаимосвязанных совокупностей. Эта часть построена как информационная модель механизмов мозга. Другая часть названа исполнительной программой и содержит описание некоторых стратегий решения задач.

Исполнительная программа отображает гипотезу автора относительно общей структуры информационных процессов мышления. Видно, таким образом, что модель содержит два уровня описания человека, занятого решением задач определенного типа. Другим примером модели такого рода являются «неполные М-автоматы», описанные в последующих главах.

Для этой группы работ характерно проведение исследований в соответствии с какой-либо одной из описанных выше схем или их сочетанием, причем некоторые из этапов исследований, предполагаемых этими схемами, либо выполняются в сокращенном виде, либо представлены в неявной форме. Рассмотрим такие возможности подробнее.

Этапы непосредственного изучения объекта и составления описаний (гипотез) в различных работах представлены в разном объеме. Так, существует большое количество работ, где этап непосредственного изучения объекта либо практически не представлен, либо представлен не систематическим экспериментом с четкой организацией процедуры и протоколированием, а лишь некоторой суммой наблюдений за поведением людей в естественных условиях [14, 16, 17].

**Способы использования эвристик.** Как было отмечено выше, в ходе решения задач человек часто использует правдоподобные заключения, рассуждения, догадки, эмпирические правила, упрощения и т. п. Приемы такого рода не всегда приводят к успеху при решении конкретной задачи, однако в большинстве случаев оказываются полезными. Такие приемы, направленные на ограничение области поиска решений, называют обычно эвристическими приемами и правилами, или эвристиками. Посмотрим, что представляет собой эвристика с точки зрения обсуждаемых нами схем.

Нетрудно обнаружить, что характер использования эвристик при решении задач ИР находится в определенной связи со сложностью последних. При решении сравнительно простых задач обычно используют формульное представление описаний, а их анализ проводят с помощью строгих математических методов. Существуют, однако, такие математические задачи, решение которых требует применения эвристических приемов. Решение, основанное на догадке или аналогии, представляется математику неубедительным и требующим проверки. Такая проверка осуществляется путем строгого обоснования найденного эвристическим путем результата с помощью формального выведения его из исходных посылок. Относительная простота задачи допускает такое выведение, и в окончательной форме доказательство носит характер строгого, корректного построения. Эвристика же оказывается «вытесненной» из решения. Процесс такого рода весьма типичен для решения математических задач и подробно описан многими математиками [3, 44, 45, 50].

С усложнением задач роль эвристических приемов в их решении повышается. При этом строгий характер решения в целом сохраняется, а использование эвристик имеет эпизодический характер: к нему прибегают в «трудных» местах

доказательств, где попытки применения строгих методов не приводят к успеху [39, 40, 68]. Однако случается, что такого рода использование эвристических приемов не удается впоследствии «замаскировать» цепочками дедуктивных выводов. Этому препятствует сложность решаемой задачи. В таких случаях решение и в окончательной форме содержит интуитивные допущения, т. е. эвристика присутствует в нем как необходимое звено. Результаты такого рода, будучи некорректными, часто оказываются тем не менее весьма эффективными при решении важных практических задач.

В качестве примера укажем на разработанную Р. Беллманом процедуру динамического программирования [11], основанную на использовании ряда эвристик планирования. Эта процедура позволяет находить близкие к оптимальным решения для ряда таких задач, сложность которых исключает применение других, более строгих методов. К сожалению, не все математики быстро оценили целесообразность разработок такого рода. Охраняя чистоту математических методов, такие исследователи отгородились от изучения сложности высказыванием «эвристика — плохая математика», забывая о том, что «хорошая математика» в сложных случаях оказывается плохим инструментом исследования. В настоящее время, однако, имеется уже большое количество работ, основанных на сознательном использовании эвристических приемов.

Для задач максимальной сложности, связанных, как правило, с автоматизацией высших форм мышления и деятельности человека, широкое использование эвристик становится практически неизбежным [51]. Здесь эвристики выступают не в форме приемов преодоления отдельных трудностей, а кладутся в основу решения. Систематизация, выбор и проверка эффективности таких эвристик составляют в данном случае основное содержание исследований. Подробно рассмотренные нами ранее схемы построения моделей поведения, процессов и механизмов мозга характеризуют исследования именно такого рода.

Сейчас для нас представляет интерес рассмотрение второго из перечисленных случаев, т. е. той ситуации, когда применяемая в ходе исследования эвристика играет роль вспомогательного приема для преодоления отдельных трудностей, но, будучи однажды использована, уже не может быть «вытеснена» впоследствии более строгими построениями и остается в решении как его непосредственное и необходимое звено. Посмотрим, каковы особенности эвристик такого рода.

Следуя некоторым авторам [62], будем различать специализированные и универсальные эвристики. Специализированные эвристики — это такие приемы и правила, примене-

ние которых оказывается полезным при решении какой-либо одной задачи (или узкого класса однотипных задач). Обычно они формулируются в языке этой задачи и следуют из анализа ее особенностей. Таковы многие эвристики шахматной игры.

Универсальные эвристики, напротив, оказываются полезными при решении широкого класса задач; они сформулированы в виде правил и указаний весьма общего характера и следуют из обобщения большого числа наблюдений или специального исследования особенностей и структуры человеческой деятельности. Примерами универсальных эвристик являются правило «обратного пути» при доказательстве теорем, метод анализа целей и средств, эвристики планирования и т. п. Универсальные эвристики широко применяются в различных работах, поэтому именно их мы будем иметь в виду при дальнейшем рассмотрении.

Как уже упоминалось, эвристические приемы и правила возникают в результате обобщения наблюдений за процессами решения задач многими исследователями и — реже — в ходе специально поставленных экспериментов. Таким образом, они формулируют то общее, что имеется в поведении различных людей, и являются, следовательно, статистическими описаниями, моделями этого поведения. В момент, когда исследователь формулирует и решает использовать на практике ту или иную эвристику, он, естественно, не убежден еще в ее эффективности. И даже впоследствии, применив ее, он не может ожидать, что она окажется полезной и в других случаях. Отсюда следует, что эвристике как описанию определенной деятельности человека присущ выраженный гипотетический характер.

Формулирование эвристик происходит в два этапа. На первом осуществляются наблюдения за деятельностью людей, решающих задачи, на втором — осмысливаются и систематизируются результаты этих наблюдений. Второй этап завершается выдвижением гипотезы, описывающей некоторые закономерности поведения. Именно эти гипотезы и выражаются в виде эвристического правила. Нетрудно заметить, таким образом, что этапы формулирования эвристик хорошо соответствуют этапам изучения объекта и выдвижения гипотез, которые упоминались при обсуждении общих схем моделирования. Иногда оба этапа выполняются осознанно и целенаправленно. В некоторых же случаях эти этапы протекают скрыто, без явного осознания их исследователем, и тогда эвристика открывается им неожиданно, в виде догадки или «озарения».

Проверка гипотез в общем случае производится путем построения и исследования действующих моделей. Аналогичные процедуры реализуются и при использовании эвристик,

Здесь имеется, правда, определенная специфика. Она состоит в том, что эвристика, принятая на некотором этапе решения, является его неотъемлемой частью. И если решение в целом оказывается успешным, то это свидетельствует об эффективности не эвристики, а данного решения, включающего в себя и эвристику. Таким образом, однократное успешное использование эвристического приема еще ничего не говорит о его пригодности в целом.

Иначе обстоит дело при широком и частом использовании данной эвристики, что как раз и характерно для рассматриваемого класса универсальных эвристик. Если то или иное правило успешно применяется при решении различных задач, то можно полагать, что оно действительно отражает нечто существенное и будет полезным в большом числе случаев. Таким образом, широкое использование эвристики является формой ее проверки. Каждый отдельный акт такой проверки связан с представлением эвристики в той или иной конкретной форме, в определенном языке, отражающем специфику решаемой задачи. Эту операцию можно трактовать как построение модели проверяемой эвристики-гипотезы. Многократная проверка различных моделей одной гипотезы в разных условиях (задачах) и является аналогом последнего этапа общей схемы моделирования — этапа исследования поведения моделей.

Мы убедились, таким образом, что описанные ранее принципиальные схемы моделирования сложного поведения удовлетворительно характеризуют также и особенности применения эвристик в тех случаях, когда они выступают в качестве вспомогательных приемов при решении задач. При этом описываемые схемами процессы формирования и проверки эвристик составляют лишь отдельные фрагменты общей структуры решения. Для таких процессов характерно, что те или иные их этапы выступают в неявной или специфически измененной форме. Имея в виду это обстоятельство, мы и рассматриваем процедуры использования универсальных эвристик как исследования, проводящиеся по редуцированным схемам.

В заключение отметим, что исследования по редуцированным схемам составляют значительную часть работ, выполненных в области искусственного разума.

## § 7. *Исследование больших гипотез*

В области работ по искусственному разуму предпринимаются попытки построить максимально общую теорию, объясняющую поведение человека, и создать тем самым единую основу для построения широкого класса моделей сложных

видов деятельности, а в конечном счете — и некоторую единую модель, реализующую основные принципы работы мозга. Построение такой действующей модели и явилось бы, собственно, решением проблемы искусственного разума. Ясно, что эта задача относится к числу наиболее сложных задач, какие только можно поставить перед современной наукой. Работы в этой области мы и объединили под общим названием «большие гипотезы». Таких работ немного, и каждая из них представляет огромный интерес, так как может послужить основой для ряда важных разработок более частного характера и для развития целого направления исследований.

В каждой из больших гипотез сконцентрированы в той или иной степени основные достижения наук о человеке, существующие на соответствующем этапе их развития. В качестве примеров больших гипотез, возникших, к сожалению, слишком рано — в период, когда не существовало адекватных технических средств их исследования, можно назвать систему взглядов выдающегося физиолога И. П. Павлова на законы высшей нервной деятельности, теорию поведения О. Хебба и некоторые другие. Многие из выдвигавшихся ранее больших гипотез не потеряли своей актуальности и до настоящего времени, и их исследование методами моделирования может принести интересные и неожиданные результаты.

Мы не будем подробно анализировать процедуры исследования больших гипотез, предлагать в этих случаях какие-либо схемы вряд ли целесообразно. Кратко отметим лишь две из имеющихся здесь особенностей, которые, несмотря на их очевидность, представляются нам весьма важными.

Одна из них связана с тем, что проверка большой гипотезы практически может осуществляться только по частям, т. е. так, что в конечном счете гипотеза должна быть отражена системой взаимосвязанных и согласованных между собой «частных» действующих моделей. При этом каждая из моделей решает задачи проверки отдельных положений и идей гипотезы или некоторых их совокупностей. Необходимость такого подхода объясняется именно сложностью гипотезы, исключающей возможность построения на ее основе некоторой единой модели с помощью существующих технических средств и теоретических аппаратов.

Преимущество системы моделей состоит, очевидно, в том, что ее можно строить постепенно, начиная со сравнительно простых частных моделей, отражающих основные, фундаментальные положения гипотезы, и последовательно усложняя их, добавляя новые и устанавливая связи между уже имеющимися моделями. Выделение в гипотезе отдельных проверяемых фрагментов и разработка стратегии их модель-

ного исследования в каждом конкретном случае является весьма ответственной и тонкой задачей.

Другая особенность больших гипотез связана с языком, на котором они формулируются. Ранее мы ввели представление о конструктивности языка гипотезы и определили его в отношении к средствам реализации действующих моделей. В рассматриваемом случае это определение, очевидно, не является удовлетворительным. В самом деле, большая гипотеза в целом не должна быть ориентирована на использование тех или иных конкретных средств моделирования: ее основной смысл и специфика состоят в содержательном задании принципов воспроизведения объекта. Более того, для модельной реализации большой гипотезы часто оказывается целесообразным не использование имеющихся, а разработка новых средств реализации — создание специальных технических устройств, новых алгоритмических языков программирования и т. п. Таким образом, понятие конструктивности в данном случае имеет несколько иной смысл. Для того чтобы уточнить его, укажем на следующее обстоятельство.

Большая гипотеза, как правило, формулируется в рамках не одной какой-либо конкретной науки, изучающей человека, а должна включать в себя в общем случае данные различных конкретных наук. Для того чтобы решить эту задачу, необходим, очевидно, такой язык, который был бы удобен при описании общих принципов построения разумного поведения, тех принципов, которые изучаются каждой из конкретных наук на своем уровне и своими специфическими методами.

Таким языком в настоящее время является, по-видимому, язык описания процессов переработки информации. Этот язык конструктивен в том отношении, что, с одной стороны, он оказывается адекватным для представления существенных свойств процессов, изучаемых нейрофизиологией и психологией, и, следовательно, удобен для выражения в нем как данных обеих этих наук, так и более общих принципов и схем управления; с другой стороны, сформированные в этом языке описания могут быть естественным образом реализованы в виде действующих моделей с помощью средств аналоговой и цифровой вычислительной техники, хорошо развитой в настоящее время.

Построение действующих моделей гипотез принципиальным образом связано с введением числовой меры в исходное описание. Это обстоятельство должно учитываться и при формировании больших гипотез, а именно: основные параметры, вводимые гипотезой, должны быть представимы в числовой форме. Естественно, что сама гипотеза вряд ли может и должна содержать предположения о конкретном значении вводимых ею параметров. Однако желательно, чтобы она

допускала последующее введение числовых мер без существенных изменений в своей структуре, была бы заранее ориентирована на выполнение этого важного этапа моделирования.

Большие гипотезы, как правило, содержат более или менее обобщенные, абстрактные описания объекта. При их моделировании, следовательно, неизбежен процесс конкретизации, уточнения и дополнения отдельных положений. Желательно поэтому, чтобы гипотеза в явном виде включала в себя и некоторые рекомендации для такой «расшифровки», предусматривала ее основные принципы, которые позволяли бы наложить ограничения на множество возможных вариантов интерпретации исходных положений. Гипотеза является конструктивной в тем большей степени, чем меньшее число вариантов своей реализации она допускает.

В заключение можно сказать, что чем полнее та или иная гипотеза удовлетворяет намеченным выше требованиям, тем короче оказывается путь от ее выдвижения до проверки и тем в большей степени действующие модели соответствуют исходным представлениям и идеям автора.

Мы рассмотрели, таким образом, основные направления исследований в области ИР. Предпринимая попытку систематизации в столь сложной и быстро развивающейся области исследований, мы стремились по возможности четко выделить принципиальные схемы и особенности основных направлений, с тем, прежде всего, чтобы подчеркнуть специфику работ по искусственному разуму и показать отличие этих работ от близких к ним с формальной точки зрения модельных исследований в области психологии и нейрофизиологии.

*Раздел II*

## М-АВТОМАТЫ И ПРОГРАММЫ РАЗУМНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Гипотеза о программах и механизмах переработки информации мозгом человека может быть отнесена к классу больших гипотез, особенности которых обсуждались в предыдущей главе. В соответствии с этим гипотеза должна ответить на такие основные вопросы: 1) что именно делает мозг человека как система, управляющая его поведением, в чем состоит принципиальный смысл протекающих в мозге процессов и 2) как реализует мозг свои функции, каковы возможные механизмы такой реализации. Ответ на первый вопрос должен определить те аспекты работы мозга, которые необходимо воспроизвести в моделях, способных к разумному поведению, ответ на второй — основные пути практической реализации действующих моделей.

Мозг, согласно гипотезе,— система, воспринимающая, хранящая и перерабатывающая информацию. С этой точки зрения протекающие в мозге процессы рассматриваются как процессы формирования и функционирования информационных моделей внешнего и внутреннего мира. В качестве информационной системы мозг может быть описан путем перечисления реализуемых им программ. Понятие программы является весьма общим и применимо для описания любой сложной системы. Указание набора и содержания программ какой-либо системы служит своеобразной формой ее определения, а воспроизведение тех же программ другими средствами составляет задачу моделирования. Основной системой искусственного разума является, следовательно, создание таких технических систем, программы которых совпадали бы с программами мозга.

Термин «программа» имеет несколько значений. В кибернетической литературе наиболее часто его употребляют для обозначения последовательности команд для ЦВМ. Отметим, что в данном разделе мы не будем использовать термин «программа» в таком смысле. Если же это окажется необходимым, то всякий раз специально это оговорим.

Многие из вводимых ниже понятий могут быть естественным образом формализованы в терминах, например, теории конечных автоматов. Мы, однако, отказались от такой формализации, так как наша цель — дать читателю содержательное представление об используемом подходе.

Понятие программы является инструментом теоретического анализа поведения систем. Мы не предлагаем рассматривать человека как некоторый программный автомат, поведение которого в каждый момент времени определяется развитием какой-либо одной программы. Такого рода подход, в принципе, может быть, и правомерный, неизбежно окажется неконструктивным из-за огромного разнообразия как поведенческих реакций, так и внешних воздействий, которые человек может воспринять и на которые он в состоянии

адекватно реагировать. Напротив, понятие программы используется нами для описания возможных реакций человека в некоторых абстрактных, условных ситуациях, предъявляющих человеку единственное внешнее воздействие (при этом безразлично, будет ли такое воздействие осознано). Что же касается реальных ситуаций, содержащих множество раздражителей, то поведение человека в них рассматривается как результат одновременного развития и взаимодействия между собой множества различных программ.

При построении действующих моделей сложного поведения нам придется решать задачи воспроизведения программ с помощью тех или иных технических средств. Физические и вычислительные устройства, предназначенные для воспроизведения определенных программ, будем называть автоматами. В соответствии с данным определением, автомат — всегда искусственная система, построенная специально для воспроизведения каких-либо программ. Таким образом, действующие модели поведения, процессов переработки информации и механизмов мозга есть автоматы.

Построение действующей модели системы подразумевает построение автомата, реализующего описание системы. Поведение этого автомата должно хорошо совпадать с поведением системы-оригинала, что и является основным требованием, предъявляемым к действующим моделям в области искусственного разума.

*Глава 3*

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ ГИПОТЕЗЫ

Гипотеза о программах переработки информации мозгом и механизмах их реализации основана на анализе существующих нейрофизиологических, нейропсихологических и психологических данных. Подробно гипотеза изложена в работах [4—7]. В настоящей главе мы ограничимся лишь кратким описанием некоторых ее положений и введем используемую в дальнейшем терминологию.

### § 1. *Мозг как моделирующая система*

Высшие отделы центральной нервной системы человека включают в себя иерархически организованные подсистемы. В информационном аспекте отношения между этими подсистемами есть отношения моделирования: каждая высшая подсистема отображает в состояниях некоторых своих элементов состояния низшей подсистемы, т. е. моделирует ее. Вершина этой иерархии — кора головного мозга.

Кора содержит информационные модели состояний нижележащих отделов мозга и постоянно формирует динамиче-

ские модели процессов, развивающихся в этих отделах. Так, например, известно, что формирование эмоциональных состояний человека связано с функциями определенных подкорковых структур (таламуса, гипоталамуса, лимбической системы). Различные состояния этих структур представлены в коре своими информационными моделями. Поэтому возникновение какого-либо определенного состояния, связанного, к примеру, с потребностью в пище, вызывает активность соответствующей модели в коре. Активирование такой модели сопровождается специфичным субъективным переживанием и осознанием чувства голода. Та же самая модель может быть активирована не только возникновением соответствующего ей состояния подкорковых образований, но и влиянием на нее других моделей, имеющихся в коре. Активированная корковая модель, как правило, поддерживает соответствующее ей состояние подкорковых образований, так что между этими двумя элементами в общем случае могут существовать как прямые, так и обратные связи.

С другой стороны, кора содержит в себе модели объектов, явлений и процессов внешнего по отношению к человеку мира. Эти модели формируются в результате работы анализаторных систем. Если модель какого-либо объекта уже сформирована в коре, то повторное восприятие этого объекта активирует его модель. Активность корковой модели переживается человеком субъективно в виде мысли о соответствующем объекте. В общем случае мысль об определенном объекте вызывает настройку рецепторов и анализаторов на его восприятие, так что и в этом случае можно говорить о наличии механизмов обратной связи. Как и в предыдущем случае, активность модели может быть вызвана не только непосредственным восприятием соответствующего объекта, но и влиянием со стороны других моделей — «по ассоциации».

Поясним смысл уже использованного нами понятия *активности,* или *возбуждения,* корковой модели. Это — одно из важнейших понятий гипотезы. Ему не следует приписывать какого-либо физиологического содержания — понятие активности фиксирует исключительно информационные характеристики состояния моделей.

Модель — это некоторый функциональный элемент коры, фиксирующий определенную информацию. Несколько упрощая, будем говорить, что результатом процессов переработки информации в коре является принятие тех или иных решений. Очевидно, что для принятия определенного решения не обязательно использовать весь объем имеющейся информации. Отдельные ее фрагменты при выработке данного решения не имеют ценности, не являются актуальными. Одни фрагменты могут играть в этом случае вспомогательную, другие — ведущую роль. Можно говорить, таким образом,

о *мере* использования той или иной информации в формировании решения.

Именно эту меру и характеризует степень активности моделей. Иначе говоря, чем активнее информационная модель в данный момент, тем бóльшую роль в процессе формирования решения играет в этот момент соответствующая этой модели информация. Активность, следовательно, может иметь различные значения; мы будем характеризовать ее специальной числовой переменной, называемой *возбужденностью* модели. Возбужденность может изменяться от нулевого до некоторого максимального положительного значения. Если возбужденность модели в некоторый момент равна нулю, это означает, что соответствующая информация в данный момент не используется и модель является пассивным элементом системы, осуществляющим функцию хранения информации. Рост возбужденности указывает на включение модели в процесс подготовки решения, а значение возбужденности — на степень участия модели в этом процессе. Можно сказать, что значение возбужденности модели характеризует меру прагматической ценности соответствующей информации.

Введенное таким образом понимание активности является несколько упрощенным, и в дальнейшем мы уточним его в ходе описания аппарата моделирования.

Итак, гипотеза представляет кору в виде некоторой совокупности информационных моделей объектов и явлений внешнего и внутреннего мира человека. Процессы переработки информации в коре трактуются как процессы взаимодействия таких моделей. Сущность этого взаимодействия состоит в том, что в зависимости от степени собственной активности каждая из моделей может изменять состояние, т. е. степень возбуждения, других моделей. При этом чем выше возбужденность модели, тем сильнее ее воздействие. Воздействие одной модели на другую может быть как усиливающим, так и тормозным. Передача воздействий осуществляется по определенным каналам — *связям*, имеющимся между моделями. Гипотеза определяет закономерности возникновения, исчезновения и изменения состояния связей.

Таким образом, процессы переработки информации выражаются в изменении активности информационных моделей. Большую роль в этих процессах играет система усиления — торможения (СУТ), которая изменяет активности различных моделей в зависимости от степени важности соответствующей им информации и дает возможность быстро перераспределять эту активность при изменении внешней обстановки или состояния организма.

Функцией СУТ является выделение и усиление в каждый момент времени модели (или группы моделей) с наибольшей

активностью. Все другие при этом автоматически тормозятся. Законы СУТ таковы, что возбужденность выделенной модели в последующие моменты времени резко снижается и СУТ переключается на другую модель (модели), обладающую наибольшей активностью. В результате доминирующую роль в процессе взаимодействия информационных моделей постоянно играют те из них, которые фиксируют наиболее важную в данный момент информацию.

О наличии некоторого механизма, упорядочивающего активность мозга и обеспечивающего единую реакцию организма, свидетельствуют многочисленные работы по исследованию функционирования нервных структур. Так, еще А. А. Ухтомский связывал такой механизм упорядочения с принципом доминанты. Термином «доминанта» он обозначал «господствующий очаг возбуждения, предопределяющий в значительной степени характер текущих реакций центров в данный момент» [58, стр. 61]. Принцип доминанты А. А. Ухтомский рассматривал как «физиологическую основу акта внимания» [58, стр. 11].

Выделенную СУТ модель можно понимать как «осознанную доминанту» в отличие от всех остальных, не выделенных в этот момент, лишь «потенциальных доминант». По образным словам А. А. Ухтомского, «в душе могут жить одновременно множество потенциальных доминант — следов от прежней жизнедеятельности. Они поочередно выплывают в поле душевной работы и ясного внимания, живут здесь некоторое время, подводя свои итоги, и затем снова погружаются вглубь, уступая поле товаркам. Но и при погружении из поля ясной работы создания они не замирают и не прекращают своей жизни» [58, стр. 13].

Активность информационных моделей также постоянно изменяется во времени — уменьшается или увеличивается. Они «не замирают и не прекращают своей жизни» еще долгое время после того, как непосредственно вызвавшие их активность раздражения уже перестали действовать. В тот момент, когда модель выделяется СУТ, ее активность увеличивается, она «выплывает в поле душевной работы и ясного внимания», затем активность снижается и модель «погружается вглубь, уступая поле товаркам».

Деятельность СУТ позволяет дать содержательную интерпретацию таким терминам, как сознание и подсознание, мышление, мысль [4]. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены ниже.

Итак, кора содержит модели состояний нижележащих отделов мозга и модели внешнего мира. Кроме того, в коре имеются модели эффекторных систем организма (их состояний и программ). В ходе функционирования в коре возникают также модели более высоких уровней — модели моде-

лей, соответствующие абстрактным понятиям и представлениям. Все эти модели могут связываться между собой, образуя в целом некоторую динамическую систему, которая отображает в своих состояниях внутренние побуждения и внешние условия организма, интегрируя их и вырабатывая на этой основе сложные поведенческие реакции.

Понимаемые таким образом интегративные функции коры и должны явиться, согласно гипотезе, основным объектом изучения и моделирования, проводимого как с целью их познания в рамках психологии, так и для создания технических систем, способных к разумному поведению.

В заключение остановимся на рассмотрении некоторых дополнительных аспектов гипотезы. Представление о том, что суть протекающих в мозге процессов (при их рассмотрении в информационном аспекте) состоит в формировании единой внутренней информационной модели внешнего мира, не является новым и высказывалось уже рядом авторов [12, 66]. В рамках предлагаемой гипотезы, по существу, предпринимаются дальнейшие шаги по развитию и конкретизации упомянутого представления. Эти шаги связаны со стремлением в конструктивной форме ответить на вопросы о том, какова принципиальная структура внутренней информационной модели, каковы законы ее функционирования и формирования, как реализуются ее управляющие функции. Предлагаемые гипотезой ответы основаны на представлении о внутренней модели мира как о *совокупности* корковых информационных моделей его отдельных объектов. Такие модели взаимодействуют не только друг с другом, но и с моделями состояний нижележащих отделов мозга, эффекторных систем и т. д. Все представленные в коре модели рассматриваются как функционирующие по сходным законам функциональные элементы единой информационной системы — внутренней модели мира.

Одним из рабочих положений гипотезы является аналогия, устанавливаемая между законами формирования и характеристиками корковых информационных моделей, с одной стороны, и законами формирования и характеристиками нейронных ансамблей типа хеббовского [54, 77] — с другой.

В настоящее время принято считать, что основной структурный элемент мозга — нейрон. Что же касается определения функциональной единицы мозга, то здесь единого мнения нет. Часть нейрофизиологов полагает, что такой функциональной единицей также является нейрон. Однако объяснение ряда феноменов высшей нервной деятельности при таком понимании оказывается затруднительным. Для того чтобы преодолеть эти трудности, допускается значительное расширение функций нейрона, не вытекающих непосредственно из его физиологических свойств [32].

Развитие нейрофизиологических исследований показало, что в качестве функциональной единицы мозга имеет смысл рассматривать не отдельный нейрон, а совокупность взаимосвязанных нервных клеток — ансамбль. При определении функциональных свойств ансамбля имеется принципиальная возможность учитывать взаимодействие элементов, различных по своим физиологическим свойствам, например нейронов и глиальных клеток [15]. Это значительно расширяет возможности понимания и модельного представления сложных физиологических механизмов, лежащих в основе процессов хранения и переработки информации корой головного мозга.

Итак, мы пользуемся предположением о том, что ансамбли нервных клеток являются субстратными аналогами корковых информационных моделей. Это предположение, вообще говоря, не является необходимым для наших построений и не определяет сути гипотезы. Однако его использование удобно в том отношении, что создает эвристическую основу для задания функциональных характеристик формальных элементов, сопоставляемых с корковыми информационными моделями.

## § 2. *Понятие о программах*

Термин «программа» имеет несколько значений. В кибернетической литературе его употребляют для обозначения последовательности команд для ЦВМ. В данном разделе мы не будем использовать термин «программа» в таком смысле. Если же это окажется необходимым, то всякий раз будем специально оговаривать.

Многие из вводимых ниже понятий могут быть естественным образом представлены в терминах тех или иных формальных языков. Мы, однако, отказались от такой формализации, поскольку в рамках данного изложения стремились дать читателю лишь содержательное представление об используемом нами подходе.

Под *программой* следует понимать определенную последовательность изменений системы (или ее подсистем), которая заложена в ее структуре и реализуется при определенном входном воздействии. Совокупность программ системы характеризует, следовательно, совокупность ее возможных изменений во времени, присущих системе потенциально, определяемых ее структурой и реализующихся при поступлении на ее вход тех или иных воздействий.

Понятие программы непременно включает в себя указание на связь любой конкретной программы с определенным внешним воздействием, «запускающим» ее. Пусть имеется

некоторая система, множество возможных входных воздействий на нее и множество возможных программ этой системы. Для того чтобы охарактеризовать систему в целом, необходимо установить отношение между множеством воздействий и множеством программ так, чтобы каждому воздействию ставилась в соответствие единственная программа. Множество входных воздействий, множество программ системы и заданное между ними соответствие являются *описанием системы*. Для описания системы может быть, в принципе, использован любой аппарат, пригодный для формального или содержательного задания отношений (отображений) между различными множествами. Весьма удобным является описание программ с помощью блок-схем.

Блок-схемное описание предполагает четкое указание содержательного смысла вводимых в рассмотрение процедур, определение совокупности их входных и выходных параметров, а также фиксацию порядка их выполнения. Этот «метод квадратов и стрелок» удобен, с одной стороны, для представления содержательных, интуитивно понимаемых данных, а с другой — создает основу для конструктивного описания этих данных и последующего моделирования на ЦВМ.

Описание программы, представленное в виде блок-схемы, является статической моделью программы. В этом смысле о блок-схемном описании процессов переработки информации мозгом можно говорить как о блок-схемном моделировании этих процессов.

Отметим, что блок-схемное моделирование является, вообще говоря, промежуточным этапом при построении действующих моделей информационных процессов мозга.

Всякую систему можно изучать и описывать с разной степенью детализации, выделяя в ней большее или меньшее количество отдельных подсистем. Имея в виду это обстоятельство, обычно говорят об *уровнях описания* системы. Чем выше уровень описания, тем более обобщенным оно является, тем меньшее количество подсистем выделяется в данной системе и тем более сложными и многообразными оказываются программы подсистем. При изменении уровня описания изменяются и программы. Таким образом, при обсуждении программ необходимо в каждом конкретном случае иметь в виду их принадлежность определенному уровню описания системы.

При изучении сложных систем с целью построения их действующих моделей часто оказывается целесообразным описывать программы моделируемой системы на нескольких уровнях. Различные описания при этом взаимно дополняют друг друга и могут быть использованы, как это было показано ранее, для построения и проверки адекватности моделей.

Если мы будем изучать и описывать только внешние проявления деятельности человека, то это, очевидно, будет соответствовать изучению и описанию программ нашей системы. Программы в этом случае можно также называть *программами поведения.*

Возвращаясь к процедуре моделирования поведения, схема которой описана в предыдущей главе, можно заметить, что в ее основе лежит экспериментальное изучение и описание именно программ поведения. Исследуя эти программы, мы фиксируем в протоколах выходные сигналы, доступные нашему наблюдению: двигательную и речевую продукцию человека, решающего задачу. Дальнейшая обработка протокольных записей состоит в их содержательной интерпретации. Здесь мы формулируем программу поведения в содержательных терминах, описывающих непосредственно процесс решения.

При формальном рассмотрении процессов, протекающих в системе, мы можем наблюдать на выходах различных подсистем появление сигналов, несущих определенную информацию и поступающих на входы других подсистем для дальнейшей переработки. При содержательном рассмотрении этих процессов мы можем описать их в терминах некоторой деятельности, в терминах производимых мозгом операций.

Так, состояние всей системы в некоторый момент времени можно описать как совокупность событий такого, например, типа: «на выходе подсистемы узнавания появилось имя воспринятого объекта», «на выходе подсистемы эмоциональных оценок сформулирована обобщенная оценка ситуации» и т. п. Зная структуру связей между подсистемами, можно продолжить содержательное описание дальнейшего развития процессов: «эмоциональная оценка ситуации и имя воспринятого объекта поступают на вход подсистемы принятия решений» и т. п. Аналогичным образом можно продолжать описание сколь угодно долго.

Таким образом, содержательная интерпретация этих программ является по существу описанием процессов переработки информации, протекающих в системе. Будем поэтому такие программы называть *программами переработки информации.*

В каждом конкретном исследовании выделяется некоторый уровень описания процессов переработки информации, который считается достаточно подробным, так что рассмотрение на более низких уровнях в рамках данного исследования не проводится. Описание системы на этом, наиболее низком, уровне часто называют описанием *механизмов* системы.

В качестве уровня механизмов обсуждаемая гипотеза предлагает такой уровень описания моделируемой систе-

мы — коры головного мозга,— на котором роль ее подсистем играют корковые информационные модели объектов внешнего и внутреннего мира человека. Преимущество такого подхода состоит в том, что программы поведения корковых моделей относительно просты и могут быть заданы с помощью нескольких функциональных характеристик.

### 3. *Автоматы и среды*

Основная задача моделирования состоит в синтезе автомата на основе описания моделируемой системы. В области ИР, где речь идет о моделировании сложных систем, задача синтеза до настоящего времени в общем виде не решена. Это объясняется следующими обстоятельствами. Чаще всего сложность объекта моделирования исключает возможность подробного описания всех программ, которые должен воспроизвести автомат. Программы, следовательно, описываются не полностью или их описание дается на сравнительно высоком уровне, т. е. в весьма обобщенном виде. Кроме того, определенные трудности возникают при задании множества допустимых входных воздействий. Как правило, оказывается невозможным в явном виде перечислить все комбинации входных сигналов, которые могут возникнуть при работе будущего автомата. Вследствие этого нельзя конструктивно задать и соответствие между входными воздействиями и программами системы. Таким образом, можно сказать, что описание моделируемой системы в общем случае задается в неполной форме.

В то же время обычно имеются некоторые сведения об устройстве объекта моделирования и структуре операций, реализуемых его механизмами. Эти сведения также не являются полными и дают лишь некоторую дополнительную информацию о программах объекта и о том, как реализовано в нем соответствие между входными воздействиями и программами.

В реальных условиях, таким образом, автомат строится на основании неполного описания моделируемой системы и неполных дополнительных сведений о его структуре и функционировании. В этих условиях и оказывается необходимым выдвижение различного рода гипотез, дополняющих и уточняющих имеющиеся сведения. Конструируя на основе гипотез реальный автомат, реальное физическое или алгоритмическое устройство, мы, следовательно, не можем быть заранее уверены, что программы этого устройства будут хорошо совпадать с программами моделируемого объекта. То же самое относится и к соответствию между входными воздействиями и программами автомата.

Будем говорить, что, создавая реальный автомат, мы тем самым задаем в его структуре и операциях некоторые программы, в той или иной степени не соответствующие желаемым. Обычно заранее определяется допустимая степень такого несоответствия. И если фактическое несоответствие, наблюдаемое при исследовании уже построенного автомата, превышает допустимое, то структура автомата корректируется до тех пор, пока различия не уменьшатся в достаточной мере. Именно это и является содержанием циклических процессов «доводки» модели, рассмотренных в предыдущем разделе. В целом приведенные соображения поясняют смысл тех операций по разработке моделей, принципиальная структура которых описана ранее с помощью упрощенных схем.

Рассмотрим теперь предлагаемые нашей гипотезой конкретные способы задания программ различного типа.

Программы поведения корковых информационных моделей отображают закономерности изменения во времени их выходной активности при определенных воздействиях, поступающих на входы моделей. Входные воздействия на каждую из моделей определяются активностями других моделей, выходы которых связаны со входами данной модели. Предполагается, что количество связей, подходящих к модели, может достигать нескольких десятков. Число возможных входных воздействий на модель оказывается, следовательно, весьма большим и не может быть задано простым перечислением. Соответственно весьма большим может оказаться и число программ модели, так что задать модель, описывая каждую программу отдельно, также невозможно. Поэтому гипотеза предусматривает задание программ корковых информационных моделей путем построения специального алгоритма, на вход которого поступает информация о внешних воздействиях на модель. Алгоритм перерабатывает эту информацию таким образом, что последовательности сигналов на его выходе соответствуют программам поведения $i$-модели. Этот алгоритм и является автоматом, реализующим описание корковой модели. При построении такого автомата используются содержательные сведения о внутренней структуре корковых моделей и реализуемых ими операциях.

Программы поведения подсистем, соответствующих связям между корковыми информационными моделями, также воспроизводятся с помощью автоматов, разрабатываемых на основе содержательных представлений. Эти представления могут определять совокупность функциональных характеристик подсистемы (связи) и последовательность реализуемых ею операций. То и другое используется при построении алгоритма, задающего программы поведения связи.

Задание программ переработки информации осуществляется путем построения структур, элементами которых

являются автоматы-модели и автоматы-связи. Процессы, протекающие в такой структуре, т. е. ее программы переработки информации, определяются программами поведения элементов. Структуры такого рода и являются автоматами, задающими программы переработки информации, или, иначе говоря, действующими моделями процессов переработки информации корой головного мозга.

При разработке автоматов, способных к организации разумного поведения, важным этапом является задание *среды*, в которой функционирует автомат. Понятие среды описывает совокупность воздействий, которые могут возникнуть на входах автомата при его работе, а также правила и закономерности появления этих воздействий во времени.

В общем случае среда также задается в виде некоторого автомата, выходы которого соединены со входами действующей модели, а входы — с ее выходами. При исследованиях в области искусственного разума широкое применение находят среды специального типа, являющиеся аналогами некоторых классов естественных сред. Обычно это оказывается необходимым при построении систем, моделирующих человеческую деятельность. При построении таких сред используется информация о реально существующих законах внешнего мира и о характере протекающих в нем процессов. Иначе говоря, среды такого типа могут строиться как модели естественных сред. Это позволяет описывать поведение автомата в «естественной» среде с помощью тех же терминов, что и поведение человека. Указанная возможность может быть использована для предварительной оценки «разумности» поведения автоматов.

## § 4. *Общая структура гипотезы*

Итак, мы рассмотрели содержание некоторых основных понятий, используемых в гипотезе. В заключение данного раздела кратко остановимся на схематическом описании общей структуры гипотезы, в которой условно выделим три основные части.

*Первая часть* гипотезы включает в себя описание основных программ переработки информации человеком. На самом общем уровне модель человека представлена в виде автомата с тремя типами программ: «для себя», «для рода» и «для вида». Эти программы являются программами формирования поведенческих реакций, направленных соответственно на самосохранение, продолжение рода и поддержание вида — общества.

На более низком уровне рассмотрения выделены шесть основных программ: восприятия и переработки внешней

информации, чувств, сознания, речи, действия, труда и творчества. В процессе их уточнения и расшифровки в рассмотрение введен целый ряд элементарных программ, среди которых имеются и программы реакций, и программы формирования.

Для описания программ использован блок-схемный метод. Первая часть гипотезы представляет собой, по существу, многоуровневую блок-схемную модель процессов переработки информации мозгом. Эта модель не является, конечно, полностью завершенной. Дальнейшее ее развитие может быть направлено как на уточнение и дополнение блок-схемных описаний программ, так и на выделение и построение описаний новых программ низших уровней. Однако уже выделенные в гипотезе программы описывают весьма широкий класс информационных процессов и составляют основу для разработки целого ряда действующих моделей.

В связи с вопросами дальнейшего развития и проверки блок-схемную модель можно рассматривать в двух различных аспектах. Одним из них является психологический. Здесь блок-схемная модель информационных процессов мозга выступает как модель сложных психических функций человека, в частности мышления. Дальнейшее развитие модели в этом направлении предполагает, очевидно, проведение специальных исследований, направленных на экспериментальное изучение программ психической деятельности с целью дополнения, уточнения и проверки модели. Правомерность гипотезы может быть также установлена путем построения действующих моделей психических функций на основе их блок-схемных описаний.

В аспекте искусственного разума блок-схемная модель информационных процессов мозга выступает как теоретическая основа для построения автоматов, способных к организации разумного поведения. Именно этот аспект гипотезы и развивается в настоящей книге. При этом совокупность описанных в гипотезе программ может быть рассмотрена как конструктивное определение разума.

В настоящее время четкого определения понятия разумности не существует. Практически единственным способом установления разумности поведения данного объекта является его сравнение с поведением человека, находящегося в аналогичных условиях. Но какого человека? Ясно, что не любого, а только такого, о котором заранее известно, что он разумен. Способ оказывается, таким образом, непригодным. Правда, мы пользуемся им в обыденной жизни, сравнивая подвергаемое оценке поведение со своим собственным и получая соответственно те или иные результаты в зависимости от качества эталона. Можно было бы избежать субъективности, используя для сравнения некоторые обобщенные и

усредненные статистические нормы и схемы поведения. Такого рода норм и схем, однако, не существует и вряд ли они могут быть разработаны для огромного количества ситуаций, возникающих в реальных условиях. Ограничиться малым числом ситуаций также нельзя, поскольку одним из основных признаков разумности является способность находить хорошие решения именно в широком классе ситуаций.

Определение разумного поведения путем описания набора формирующих его программ является конструктивным в том отношении, что оно может быть использовано для построения конкретных разумно действующих автоматов. При этом степень разумности автомата может быть определена путем указания количества и типа реализуемых им программ. Кроме того, в принципе может быть разработана совокупность автоматов, каждый из которых реализует различные наборы программ. Упорядоченные по мере возрастания сложности, такие автоматы создадут некоторую «шкалу разумности», по отношению к которой можно будет оценивать разумность поведения объектов любой природы. Пока еще эта возможность является только принципиальной. Для ее практической реализации необходима дальнейшая разработка и совершенствование описаний программ переработки информации мозгом.

*Вторая часть* гипотезы содержит описание коры головного мозга на уровне ее информационных механизмов. Здесь развиты представления о функциональных единицах коры — информационных моделях объектов внешнего и внутреннего мира, реализуемых ансамблями нервных клеток, а также сформулированы правила (гипотетические) взаимодействия и доминирования моделей. На основе анализа нейрофизиологического материала определен вид статических и динамических характеристик моделей и связей между ними. Описаны программы формирования новых моделей. Развитая в этой части гипотетическая система не претендует на полное сходство с мозгом, однако может быть использована при построении действующих моделей. Дальнейшее развитие этой части гипотезы возможно в двух направлениях. Одно из них связано с уточнением и проверкой исходных положений на основе специально поставленных экспериментальных исследований в области нейро- и психофизиологии. Это направление, следовательно, предполагает исследование гипотезы в физиологическом аспекте. Другое направление связано с проверкой и коррекцией гипотезы в ходе построения ее действующих моделей.

*К третьей части* гипотезы мы условно относим те ее положения, которые посвящены описанию принципов построения автоматов, воспроизводящих те или иные программы. Эти принципы формулируются на основании представлений

о том, как именно взаимодействие корковых информационных моделей порождает поведение, или, иначе говоря, каковы должны быть общие принципы организации механизмов, описанных во второй части гипотезы, чтобы их функционирование порождало программы, описанные в первой части.

Здесь развиты, в частности, представления о том, что программы коры осуществляются в ходе взаимодействия моделей, принадлежащих трем условным этажам: жесткому — врожденному; привитому обучением; созданному в процессе самоорганизации — творчества. Соответственно описываются некоторые общие принципы предварительной организации коры, программы обучения и самоорганизации в ней. Представления, развитые в третьей части гипотезы, определяют общие правила синтеза автоматов.

Такова общая структура рабочей гипотезы, составляющей основу для конкретных разработок, описанных в последующих главах книги. Разрабатывая конкретные автоматы, мы реализуем в их структуре представления о механизмах переработки информации мозгом. Целью же разработок является воспроизведение тех или иных программ переработки информации, описанных в гипотезе.

## *Глава 4*

## АППАРАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При конструировании автоматов, способных к сложному поведению, возникает задача выбора или разработки средств, удобных для их описания. В самом деле, перед тем как приступить к непосредственному построению действующей модели с помощью тех или иных технических средств, необходимо полностью описать структуру будущей модели, свойства ее элементов и т. п. Такое описание играет роль своеобразной «принципиальной схемы» автомата и само является моделью, но моделью статической.

Выбор средств описания или его языка — важная задача. С одной стороны, такой язык должен быть удобен для выражения теоретических представлений разработчика, а также для описания тех конкретных данных, на которых основана модель. С другой стороны, язык должен допускать последующий и, по возможности, однозначный переход от статического описания к действующей модели.

Задача выбора языка описания возникает при любом моделировании и решается всякий раз с учетом целей исследования и специфики моделируемого объекта. При моделировании сложных систем, проводящемся в области искусственного разума, к языку описания предъявляются некото-

рые специфические требования. Рассмотрим их. Поскольку описание объекта является в то же время и описанием автомата, моделирующего этот объект, будем говорить о языке описания как о *языке моделирования*.

Общие требования к языку моделирования определяются особенностями построения действующих моделей сложных систем и работы с большими гипотезами, рассмотрение которых было проведено ранее. Как уже упоминалось, основное требование к языку описания конкретных моделей — *конструктивность*. Тесно связано с ним требование ориентированности языка на определенные средства технической реализации действующих моделей. В качестве таковых в области искусственного разума широко используются средства как физического моделирования, так и вычислительной техники.

Часто оказывается целесообразным предварять построение особо сложных и дорогих физических устройств разработкой и исследованием их цифровых аналогов. Иначе говоря, одно и то же описание реализуется вначале в виде действующей вычислительной модели, а затем, после ее исследования и соответствующей коррекции описания,— в виде физической модели. Вычислительная модель оказывается в этом случае как бы действующим макетом будущего физического устройства, на котором производится его предварительная проверка и настройка. Для того чтобы можно было использовать этот прием с максимальной эффективностью, желательно ориентировать язык описания одновременно и на вычислительные средства реализации моделей (т. е. на использование ЦВМ), и на определенные средства физической реализации.

Построение систем искусственного разума связано, как правило, с построением действующих моделей и представлением в них различных качественных данных [23, 54, 61, 69, 70, 74—76]. Обусловлено это тем обстоятельством, что описания прототипа ИР — человека и его поведения — носят в настоящее время преимущественно качественный характер. В то же время ясно, что при разработке систем ИР использование сведений такого рода весьма желательно или даже необходимо. Важным поэтому является следующее требование: язык моделирования должен *допускать* представление в нем качественных данных.

Модели, разрабатываемые в области ИР, являются обычно сложными, т. е. содержат большое количество связанных друг с другом переменных. Для того чтобы по возможности облегчить практическую работу с моделями (т. е. их настройку, проверку, коррекцию и т. п.), желательно, чтобы язык их описания позволял представлять всю необходимую информацию в *удобной и легкообозримой форме*.

При построении моделей широко используются эвристические приемы и предположения, эффективность которых заранее неизвестна и выясняется только в ходе исследования. Поэтому практическая работа с моделями связана, как правило, с частым внесением в модель исправлений, дополнений и т. п. Следовательно, язык моделирования должен обладать достаточной *гибкостью,* т. е. допускать внесение в модель частых изменений без перестройки модели в целом.

## § 1. *М-автоматы. Основные понятия*

Предлагаемый язык моделирования развит на основе представления о мышлении как о направленном процессе взаимодействия множества корковых информационных моделей объектов внешнего и внутреннего мира человека. Искусственные системы, строящиеся на основе этого представления, реализуются в виде специфических сетей, названных М-сетями. Узлы М-сети есть формальные элементы, которые ставятся в соответствие корковым информационным моделям. Будем называть эти узлы *i*-моделями. Связи между *i*-моделями отвечают предполагаемым связям между корковыми моделями. С содержательной стороны *i*-модели могут быть поставлены в соответствие образам и понятиям, которыми оперирует человек. Поэтому с помощью М-сети можно представлять взаимосвязанные системы образов и понятий, предположительно используемые человеком в ходе мышления. М-сеть является, таким образом, сетью с семантикой.

Уточним содержание основных понятий предлагаемого языка.

*i-Модель* есть формальный элемент, которому может быть поставлено в соответствие определенное понятие. При проведении нейрофизиологических аналогий *i*-модель сопоставляется с нейронным ансамблем. Аналог *i*-модели в психологии — внутренняя (корковая) информационная модель события внешнего или внутреннего мира. В семантическом плане *i*-модель является знаком понятия. С конструктивной точки зрения *i*-модель есть элемент некоторой структуры, который может находиться в ряде отличных друг от друга состояний. С функциональной точки зрения *i*-модель есть набор некоторых операторов или алгоритмов переработки информации. Опишем *i*-модель как элемент, обладающий следующими свойствами.

1. Каждая *i*-модель имеет конечное число входов и один выход.

2. Каждая *i*-модель может находиться в состоянии возбуждения, степень которого характеризуется числовой величиной П, называемой возбужденностью. Будем описывать

функционирование $i$-модели в дискретном времени. Возбужденность $j$ некоторой $i$-модели в момент времени $t$ будем обозначать $\Pi_j^t$.

3. $i$-Модели могут быть соединены направленными связями, по которым возбуждение передается от одних $i$-моделей к другим.

*Связь* между $i$-моделями есть формальный элемент, нейрофизиологическим аналогом которого является феномен взаимозависимости возбуждений различных ансамблей. Аналогом связи в психологии может быть ассоциативная связь. Основные свойства связи таковы.

1. Каждая связь может быть направлена от выхода $i$ какой-либо $i$-модели к одному из входов $j$ другой $i$-модели.

2. От выхода $i$-модели может отходить более чем одна связь, а к одному входу может подходить только одна связь.

3. Между двумя $i$-моделями может существовать только одна связь.

4. Каждая связь характеризуется упорядоченным набором параметров $R$, называемым проходимостью связи, или, для краткости, просто связью. Проходимость связи, направленной от $i$-модели $j$ к $i$-модели $i$, в момент дискретного времени $t$ будем обозначать $R_{ij}^t$.

*Семантика* $i$-моделей задается двумя путями: во-первых, ее определяет соответствие, установленное между данной $i$-моделью и некоторым содержательным понятием, а, во-вторых — совокупность связей, соединяющих данную $i$-модель с другими.

*Характеристики связи.* Связь $R_{ij}$ есть вектор $R_{ij} = < r_{ij}, \tilde{r}_{ij}, r_{(0)ij}, \tilde{r}_{(0)ij} >$, где параметры $r_{ij}$ и $\tilde{r}_{ij}$ — усиливающий и тормозной компоненты проходимости связи, а параметры $r_{(0)ij}$ и $\tilde{r}_{(0)ij}$ — остаточные составляющие этих компонент. Эти параметры могут принимать численные значения, что содержательно означает следующее. Возбуждение, поступающее по связи $R_{ij}$, может как увеличивать, так и уменьшать, тормозить возбудимость $i$-модели $i$. Численной мерой этих воздействий и являются значения $r_{ij}$ и $\tilde{r}_{ij}$. Эти значения могут меняться во времени, так что в случае $r_{ij} \gg \tilde{r}_{ij}$ можно говорить об усиливающем характере связи $R_{ij}$, а в обратном случае — об ее тормозном характере. Остаточные составляющие связи всегда удовлетворяют соотношениям

$$r_{(0)ij}^t \ll r_{ij}^t; \qquad \tilde{r}_{(0)ij}^t \ll \tilde{r}_{ij}^t \tag{4.1}$$

и составляют долговременную память связей (подробнее об этом см. ниже). Будем полагать, что $R_{ij} = 0$ в том случае,

если равны нулю все ее компоненты. Каждая связь описывается следующими характеристиками.

1. Характеристика проторения есть функция, описывающая зависимость проходимости связи от возбужденностей соединяемых ею $i$-моделей:

$$R_{ij}^t = R\,(\Pi_i^t,\ \Pi_j^t,\ R_{ij}^{t-1},\ \Delta^t), \tag{4.2}$$

где $\Delta$ — интегральная оценка качества функционирования М-сети. Эта оценка формируется с помощью специальных $i$-моделей сети. Она имеет смысл и может быть определена в тех случаях, когда на основе М-сети уже построена некоторая действующая модель — М-автомат, заданы цели его функционирования и определены критерии качества его работы. По отношению к этим критериям и формируется оценка $\Delta$. Конкретные механизмы и правила вычисления значений $\Delta$ будут, соответственно, определяться при построении той или иной конкретной модели.

Будем называть связь непроторенной в момент $t$, если для нее $R_{ij}^t = 0$. Если для некоторой связи $R_{ij}^{t-1} = 0$ и $R_{ij}^t \neq 0$, то будем говорить, что в момент $t$ произошло установление связи $R_{ij}$. Таким образом, установление является частным случаем проторения. Для связи непроторенной функция (4.2) может иметь иной вид, чем для проторенной, так что в случае установления

$$R_{ij}^t = R_1\,(\Pi_i^t,\ \Pi_j^t,\ \Delta^t). \tag{4.3}$$

Функцию (4.3) будем называть характеристикой установления.

2. Характеристика затухания связи есть набор функций, описывающих уменьшение значений ее параметров во времени. Эта характеристика описывает процесс уменьшения проходимости связи $R_{ij}$ при условии, что в некоторый начальный момент $t_0$ значение $R_{ij}^{t_0} \neq 0$ и во все последующие моменты времени $\Pi_i = 0$ и $\Pi_j = 0$. Для усиливающих и тормозных компонентов связи характеристики затухания имеют вид

$$r_{ij}^t = r_1\,(r_{ij}^{t-1},\ r_{(0)\,ij}^t), \tag{4.4а}$$

$$\tilde{r}_{ij}^t = r_2\,(\tilde{r}_{ij}^{t-1},\ \tilde{r}_{(0)\,ij}^t). \tag{4.4б}$$

Функции (4.4а) и (4.4б) описывают такой процесс затухания, при котором значения $r_{ij}$ и $\tilde{r}_{ij}$, уменьшаясь, стремятся к значениям их остаточных составляющих. Для остаточных составляющих характеристики затухания

$$r_{(0)\,ij}^t = r_3\,(r_{(0)\,ij}^{t-1}), \tag{4.5а}$$

$$\tilde{r}_{(0)\,ij}^t = r_4\,(\tilde{r}_{(0)\,ij}^{t-1}) \tag{4.5б}$$

таковы, что описывают стремление значений $r_{(0)ij}$ и $\tilde{r}_{(0)ij}$ к нулю. Усиливающие и тормозные компоненты затухают во времени намного быстрее, чем их остаточные составляющие. Поэтому, начиная с момента $t_0$, проходимость $R_{ij}$ уменьшается сравнительно быстро («кратковременная память связей»). Затем значения $r_{ij}$ и $\tilde{r}_{ij}$ достигают значений $r_{(0)ij}$ и $\tilde{r}_{(0)ij}$, и, поскольку условия (4.1) должны всегда сохраняться, дальнейшее уменьшение $R_{ij}$ происходит в соответствии с характеристиками (4.5а) и (4.5б), т. е. существенно медленнее («долговременная память связей»).

3. Характеристика передачи связи определяет значение воздействия $E_i(\tilde{E}_i)$ на входе $i$-модели $i$ в зависимости от проходимости $r_{ij}(\tilde{r}_{ij})$ связи между $i$-й и $j$-й $i$-моделями и величины возбужденности $\Pi_j$. В общем случае для $i$-й $i$-модели будем рассматривать величину входного воздействия по усиливающим ($E_i$) и тормозным ($\tilde{E}_i$) связям:

$$E_i^t = E(\Pi_1^t, \Pi_2^t, \ldots, r_{i1}^t, r_{i2}^t, \ldots), \tag{4.6а}$$

$$\tilde{E}_i^t = \tilde{E}(\Pi_1^t, \Pi_2^t, \ldots, \tilde{r}_{i1}^t, \tilde{r}_{i2}^t, \ldots). \tag{4.6б}$$

*Характеристики i-модели.* В каждый момент времени каждая $i$-модель обладает определенной возбудимостью, под которой понимается способность $i$-модели отвечать собственным возбуждением на входное воздействие по усиливающим связям. Чем выше возбудимость $i$-модели, тем большей возбудимостью ответит она на постоянное входное воздействие. Возбудимость $i$-модели может изменяться во времени. Будем характеризовать возбудимость $i$-й $i$-модели двумя параметрами. Один из них — порог возбуждения $i$-модели $\Theta_i^t$, представляющий собой минимальное значение $E_i^t$, необходимое для возбуждения $i$-й $i$-модели в момент $t$. Другой параметр — условный коэффициент возбудимости $K$. Будем различать два значения $K$ — текущее ($K_i^t$), изменяющееся в зависимости от величины тормозных воздействий $\tilde{E}_i^t$, и начальное ($K_{ni}^t$). Значения параметров $K_{ni}^t$ и $\Theta_i^t$ могут изменяться во времени значительно медленнее, чем $K_i^t$. Перечислим характеристики $i$-моделей.

1. Характеристика торможения есть функция, определяющая изменение возбудимости $i$-модели в зависимости от величины суммарного воздействия на нее по тормозным связям:

$$K_i^t = \Phi(K_{ni}^t, \tilde{E}_i^t). \tag{4.7}$$

2. Характеристика затухания есть функция, определяющая изменение возбужденности $i$-модели во времени:

$$\Pi_i^t = T(\Pi_i^{t-1}, K_{ni}^t). \tag{4.8}$$

Функция (4.8) описывает процесс уменьшения возбужденности при отсутствии воздействий на входах $i$-модели и характеризует «временную память возбуждений» $i$-моделей.

3. Характеристика возбуждения есть функция, определяющая значение возбужденности на выходе $i$-модели в зависимости от возбудимости $i$-модели и величины суммарного воздействия на нее по усиливающим связям:

$$\Pi_i^t = \Pi(K_i^t, \Theta_i^t, E_i^t). \tag{4.9}$$

4. Характеристики гипертрофии и адаптации определяют значения $K_{ni}^t$ и $\Theta_i^t$ в зависимости от возбужденности $i$-модели:

$$\Theta_i^t = \Theta(\Theta_i^{t-1}, \Pi_i^t), \tag{4.10а}$$

$$K_{ni}^t = K(K_{ni}^{t-1}, \Pi_i^t). \tag{4.10б}$$

Функции (4.10а) и (4.10б) таковы, что определяемые ими изменения параметров невелики в каждый момент дискретного времени. Эти функции задаются таким образом, что для $i$-моделей, которые в течение длительного времени обладают малой возбужденностью, значение порога увеличивается, а значение коэффициента возбудимости уменьшается («адаптация»). В результате редко или слабо возбуждающиеся $i$-модели оказываются трудновозбудимыми и мало влияют на процессы в сети. Если $i$-модель возбуждается часто и сильно, функции (4.10а) и (4.10б) обеспечивают уменьшение значения ее порога и увеличение коэффициента возбудимости («гипертрофия»).

*М-сеть.* Назовем М-сетью совокупность $i$-моделей и связей между ними. Для того чтобы с помощью М-сети построить модель некоторого объекта, необходимо в соответствии со спецификой этого объекта и целями моделирования задать М-сеть: зафиксировать совокупность $i$-моделей и их содержательных интерпретаций; задать связи между $i$-моделями, т. е. заранее определить их начальную конфигурацию в сети и начальное распределение $C$ их проходимостей; зафиксировать начальное значение параметров и вид характеристик $i$-моделей и связей; зафиксировать начальное распределение $J$ значений возбужденностей $i$-моделей. В ходе функционирования М-сети все первоначально заданные элементы могут изменяться. Этап задания сети является по существу этапом предварительной организации разрабатываемой модели.

Одним из основных принципов предварительной организации М-сетей является принцип иерархичности структуры, обеспечивающий возможность многоуровневой переработки

информации. Связи между *i*-моделями различных уровней отражают родо-видовые отношения соответствующих понятий. Кроме того, между *i*-моделями сети могут быть установлены «ассоциативные» связи.

Часто в М-сети бывает удобно выделять такие непересекающиеся подмножества *i*-моделей, каждое из которых удовлетворяет требованию смысловой однородности, близости содержательных интерпретаций входящих в него *i*-моделей. Будем называть такие подмножества сферами М-сети. Можно говорить, например, об эмоциональной сфере, имея в виду множество таких *i*-моделей, каждая из которых поставлена в соответствие представлению об определенном эмоциональном состоянии человека. Можно выделять также сферы понятий, двигательных реакций и т. п. Взаимосвязь сфер осуществляется благодаря наличию связей между *i*-моделями, входящими в разные сферы.

*Процессы в М-сети.* М-сеть является, по существу, статической моделью, отображающей взаимосвязь определенных образов и понятий, а также степень их участия в процессах формирования воспроизводимой деятельности. Сами эти процессы и собственно деятельность могут быть реально воспроизведены только после того, как будет задан некоторый алгоритм, обеспечивающий функционирование М-сети во времени. Такой алгоритм должен реализовать изменение состояний *i*-моделей и связей М-сети в соответствии с введенными характеристиками. Для того чтобы дать читателю содержательное представление о том, как «работают» введенные ранее понятия, рассмотрим динамику процессов, которые могут протекать в М-сети, если алгоритм ее функционирования будет задан. Поскольку описание аппарата моделирования еще не завершено, это рассмотрение будет носить приближенный, в значительной степени условный характер. В дальнейшем оно будет уточнено. Пусть на основе М-сети разрабатывается некоторая модель поведения. Будем считать, что М-сеть уже задана. Пусть модель находится в некоторой среде, содержащей «объекты». Будем полагать, что восприятие моделью определенного объекта среды возможно только в том случае, если в М-сети существует *i*-модель, соответствующая этому объекту. Совокупность *i*-моделей, соответствующих различным объектам среды, составляет сферу восприятия М-сети. Таким образом, восприятие моделью информации об объектах среды (т. е. восприятие ситуации) заключается в возбуждении соответствующих *i*-моделей в сфере восприятия М-сети. Отсюда по существующим между *i*-моделями связям возбуждение распространяется внутрь сети. Уточним это представление.

Напомним, что функционирование М-сети рассматривается в дискретном времени. Пусть в некоторый момент $t - 1$

каждая из $i$-моделей сети имела определенную возбужденность. Используя характеристики передачи связей (4.6), можно определить для каждой $i$-модели суммарные значения поступающих в нее входных воздействий. Далее, по характеристике торможения (4.7) для каждой $i$-модели можно установить значение коэффициента ее возбудимости, а по характеристике затухания (4.8) — степень влияния, или «переноса», ее возбужденности в момент $t-1$ на ее же возбужденность в момент $t$. И, наконец, с помощью характеристики возбуждения (4.9) для каждой $i$-модели можно найти значение того компонента ее возбужденности в момент $t$, который возникает как ответ на входное воздействие по усиливающим связям. Используя найденные величины, можно определить окончательное значение возбужденности каждой $i$-модели в момент $t$ с помощью специальной формулы пересчета, которая строится на основе отдельных характеристик (4.6) — (4.9) и в общем виде может быть представлена так:

$$\Pi_i^t = \Phi(E_i^t, \tilde{E}_i^t, \Pi_i^{t-1}, K_{\text{н}i}^{t-1}, \Theta_i^{t-1}). \qquad (4.11)$$

Следует отметить, что формула пересчета характеризует М-сеть в целом: конкретный вид этой формулы определяется один раз при построении модели и не изменяется при ее применении к каждой из $i$-моделей данной М-сети. Это отличает ее от характеристик торможения, возбуждения и затухания $i$-моделей, вид которых для различных $i$-моделей может быть разным.

Итак, применив формулу пересчета к каждой из $i$-моделей сети, мы определим значения их возбужденностей в момент $t$. Будем полагать, что расчет возбужденности производится для всех $i$-моделей сети одновременно. Назовем эту процедуру пересчетом. В результате пересчета, таким образом, вычисляется распределение возбужденностей $i$-моделей в момент $t$ на основе распределения возбужденностей в момент $t-1$. Повторяя пересчет, можно определить возбужденности в моменты $t+1$, $t+2$, ... Такие последовательные пересчеты и реализуются в любой модели, построенной с помощью М-сети.

Вернемся к рассмотрению процессов в нашей условной модели. После восприятия ситуации возбуждение по имеющимся между $i$-моделями связям распространяется внутрь сети (в ходе последовательных пересчетов). Через некоторое время оказываются в разной степени возбужденными определенные (может быть, все) $i$-модели М-сети. При выполнении специальных условий, которые задаются в соответствии с задачами исследования, модель осуществляет некоторое действие — реакцию на воспринятую ситуацию. (Таким условием может быть, например, возбуждение до наперед заданной степени $i$-модели некоторого действия.)

Действие модели изменяет среду, эти изменения фиксируются в сфере восприятия М-сети путем возбуждения новых $i$-моделей. Возбуждение распространяется по сети до момента выполнения условий действия. Затем выполняется новое действие и т. д. Таким образом модель осуществляет в среде некоторое поведение.

В М-сети существуют $i$-модели, возбуждение которых можно интерпретировать как интегральную оценку состояния М-сети в каждый момент времени. Эти $i$-модели соответствуют корковым центрам (гипотетическим) общей оценки состояния организма. Будем называть их $i$-моделями «приятно» (Пр) и «неприятно» (НПр). В процессе функционирования М-сети возбужденность $i$-моделей Пр и НПр постоянно изменяется, так что в любой момент времени может быть вычислено значение *общей оценки состояния*, например в виде $\Delta^t = \Pi^t_{\text{Пр}} - \Pi^t_{\text{НПр}}$. Следует отметить, что состояние М-сети тесно связано с эффективностью вырабатываемых ею решений. Так, например, если модель должна удовлетворять свой (условный) «голод», добывая «пищу», а вырабатываемые М-сетью действия таковы, что модель «пищу» не находит, то в М-сети будет сильно возбуждена $i$-модель «голод», соответственно будут возбуждаться $i$-модели других отрицательных эмоций и в результате возбужденность $i$-модели НПр будет также велика. Таким образом, оценка $\Delta$ характеризует не только состояние М-сети, но и эффективность поведения модели в целом или, что в нашем случае почти одно и то же, эффективность функционирования М-сети как системы, принимающей решения. Ясно также, что структура оценки и механизмы ее формирования определяются структурой М-сети и задаются ее предварительной организацией.

Из приведенного описания видно, что модель, построенная на основе М-сети, включает в себя ряд вспомогательных устройств, или алгоритмов. Эти вспомогательные системы непосредственно взаимодействуют со средой, выполняя роль рецепторов и эффекторов модели; реализуют специальные вычисления и другие операции, обслуживающие работу М-сети. Последняя же выступает здесь в роли высших отделов «мозга» модели, интегрирующего информацию о ее внешнем и внутреннем состоянии и вырабатывающего решения о выполнении действий.

Рассмотрим основные процессы, протекающие в М-сети при ее функционировании.

1. В зависимости от «истории» возбуждений каждой $i$-модели и в соответствии с характеристиками гипертрофии и адаптации (4.10) изменяются параметры ее возбудимости $\Theta$ и $K_{\text{н}}$. Соответственно изменяются и характеристики возбуждения, торможения и затухания $i$-модели.

2. В зависимости от «истории» совместных возбуждений каждой пары *i*-моделей и в соответствии с характеристиками проторения (4.2) и затухания (4.4) и (4.5) связей изменяется проходимость связей М-сети.

Естественно, что изменение характеристик *i*-моделей и проходимостей связей изменяет характер распространения возбуждения в М-сети. Это, в свою очередь, вызывает новые изменения характеристик и связей. Направление и вид этих изменений определяются состоянием «оценивающих» *i*-моделей Пр и НПр. Процессы, описанные в пп. 1 и 2, будем называть процессами самообучения М-сети.

3. В ходе распространения возбуждений в М-сети и в соответствии с характеристикой установления (4.2) начинают функционировать новые, т. е. бывшие ранее непроторенными, связи между *i*-моделями. Таким образом, изменяется общая конфигурация связей сети.

4. В М-сети имеется некоторое множество *i*-моделей, в исходном состоянии не связанных ни друг с другом, ни с другими *i*-моделями сети. Для этих *i*-моделей не устанавливаются также соответствия с содержательными понятиями. Элементы такого рода, строго говоря, не являются *i*-моделями. Будем называть их резервными элементами. На множестве резервных элементов задан закон их спонтанного (случайного) возбуждения.

Пусть в некоторый момент времени спонтанно возбуждается один из резервных элементов. В этот же момент оказывается возбужденной некоторая совокупность других *i*-моделей М-сети. Между *i*-моделями этой совокупности и возбудившимся резервным элементом в соответствии с характеристикой (4.2) устанавливаются новые связи. Элемент становится, таким образом, «представителем», т. е. *i*-моделью совокупности *i*-моделей, и получает некоторое семантическое значение, определяемое семантикой *i*-моделей, входящих в возбужденную совокупность.

Если и в дальнейшем *i*-модели той же совокупности часто оказываются возбужденными одновременно, то вновь установившиеся связи проторяются в еще большей степени и новая *i*-модель закрепляется. В противном же случае она вскоре распадается из-за естественного затухания связей. Аналогичным образом образуются *i*-модели временных последовательностей. Описанные процессы лежат в основе образования в М-сети новых понятий из понятий, имевшихся в ней ранее.

Процессы, описанные в пп. 3 и 4, будем называть процессами самоорганизации в М-сети. Процессы самообучения и самоорганизации могут приводить к образованию *i*-моделей «второго слоя», т. е. ансамблей из исходных *i*-моделей, которые, в свою очередь, могут образовывать ансамбли «тре-

тьего слоя» и т. д. Ансамбли такого рода можно рассматривать как новые функциональные элементы М-сети, а процесс их образования — как процесс формирования новых сложных понятий на базе имевшихся ранее.

*Группы характеристик.* Введенные ранее характеристики элементов М-сети (*i*-моделей и связей) удобно разделять на несколько основных групп. Группу характеристик пересчета составляют те характеристики элементов сети, которые непосредственно используются при пересчете возбуждений и объединены в формуле пересчета (4.11). Сюда входят характеристики (4.6) — (4.9). Группу характеристик самообучения составляют характеристики (4.3) — (4.5), описывающие процессы изменения проходимости связей и параметров возбудимости *i*-моделей. Группу характеристик самоорганизации составляют характеристики установления связей (4.2) и законы спонтанного возбуждения резервных элементов М-сети.

Дадим определение М-сети. М-сеть $\mu$ есть семерка:

$$\mu = < P, S, R, L, F, C, I >, \qquad (4.12)$$

где $P$ — множество *i*-моделей; $S$ — множество связей между *i*-моделями; $R$ — группа характеристик пересчета; $L$ — группа характеристик самообучения; $F$ — группа характеристик самоорганизации; $C$ — начальное распределение проходимостей связей; $I$ — начальное распределение возбуждений *i*-моделей.

*Система усиления — торможения (СУТ).* Общая идея и функции СУТ уже кратко обсуждались в настоящей главе при изложении основных положений рабочей гипотезы. В связи с принципиальной важностью понимания роли СУТ в функционировании М-сети остановимся на этом вопросе еще раз.

С формальной стороны роль СУТ состоит в организации положительной обратной связи в процессах переработки информации М-сетью. Это обеспечивает на каждом временном промежутке доминирование наиболее важной в приспособительном плане программы переработки информации над другими программами, параллельно развивающимися в М-сети.

СУТ функционирует следующим образом. Пусть задана некоторая М-сеть. В процессе переработки информации возбужденности *i*-моделей сети изменяются. Величина возбуждения каждой *i*-модели косвенно свидетельствует о «важности», или ценности, зафиксированной в ней информации. Естественно предположить, что выделение в каждый момент времени наиболее возбужденной *i*-модели и усиление ее влияния на общий ход переработки информации увеличит эффективность работы сети. Эти задачи и решает СУТ. В каждый момент времени она выбирает наиболее возбуж-

денную $i$-модель, дополнительно повышает ее возбужденность и уменьшает возбудимость остальных $i$-моделей (притормаживает их). Если в некоторый момент времени одинаковое наибольшее возбуждение имеют $n$ $i$-моделей, то дополнительная возбужденность от СУТ для каждой из них будет в $n$ раз уменьшена: СУТ обладает конечным «энергетическим» запасом, величина которого зависит от общего состояния сети (в частности, от состояния $i$-моделей Пр и НПр).

Алгоритмы СУТ таковы, что возбужденность выделенных ею $i$-моделей постепенно уменьшается во времени. В то же время пропорционально растормаживаются остальные $i$-модели. Возбуждение от $i$-моделей, первоначально выделенных СУТ, распространяется по сети, увеличивая возбужденность связанных с ними $i$-моделей. В результате одна из них становится максимально возбужденной, СУТ переключается на нее и весь процесс повторяется.

СУТ содержит иерархически организованные подсистемы. Чем ниже уровень подсистемы, тем меньшее количество $i$-моделей находится под ее влиянием. Подсистемы СУТ более высоких уровней производят сравнение не возбужденностей отдельных $i$-моделей, а интегральных активностей более или менее обширных зон или сфер сети.

Мы описали только один из возможных вариантов реализации СУТ. Более подробный анализ имеющихся здесь возможностей и задач проведен в работе [5]. Там же подробно обсуждается работа СУТ в ее приспособительном и психологическом аспектах.

*М-автомат.* Опишем в общих чертах структуру алгоритма функционирования М-сети. Пусть, согласно определению (4.12), задана некоторая М-сеть $\mu$. Совокупность конкретных реализаций каждого из элементов семерки (4.12) есть состояние М-сети. Алгоритм функционирования преобразовывает состояние М-сети в момент $t$ в ее состояние в момент $t + 1$. Алгоритм содержит следующие основные блоки:

1) блок пересчета, выполняющий операции в соответствии с формулой пересчета (4.11); в этом блоке определяются возбужденности всех $i$-моделей М-сети в момент $t + 1$;

2) блок обучения, в котором в соответствии с характеристиками обучения определяются новые значения проходимостей связей и параметров возбужденности $i$-моделей;

3) блок дополнения, или «роста», М-сети; здесь в соответствии с характеристиками самоорганизации устанавливаются новые связи между $i$-моделями и формируются «спонтанные» возбуждения резервных элементов;

4) блок СУТ, в котором производятся операции, реализующие алгоритм работы системы усиления — торможения;

5) блок проверки логических условий; вид этих условий определяется отдельно для каждой конкретной задачи моде-

лирования (см., например, упоминавшиеся выше условия выбора действия моделью, вырабатывающей некоторое поведение, и др.).

Функционирование М-сети обеспечивается многократным применением описанного алгоритма. Порядок выполнения различных блоков строго не фиксируется и может быть частично изменен при построении конкретных моделей. Совокупность операций, выполняемых при однократном применении алгоритма, назовем тактом функционирования М-сети. За один такт, следовательно, осуществляется полное определение состояния М-сети в определенный момент дискретного времени.

Алгоритм функционирования М-сети будем в дальнейшем для краткости называть алгоритмом $A$. Пару $<\mu, A>$ назовем М-автоматом. Такой автомат построен на основе М-сети и включает в себя алгоритм ее функционирования $A$.

Рассмотрим некоторый М-автомат $<\mu, A>$. Если $\mu$ задана в виде (4.12), будем считать такой М-автомат полным. Иногда оказывается целесообразным строить М-автоматы, в которых реализованы не все функции М-сети. В зависимости от полноты задания М-сети будем различать *самообучающиеся* М-автоматы:

$$\mu = <P, S, R, L, \varnothing, C, I> \tag{4.13}$$

и *необучающиеся* М-автоматы:

$$\mu = <P, S, R, \varnothing, \varnothing, C, I>; \tag{4.14}$$

знак $\varnothing$ обозначает, что соответствующий элемент не вводится. Алгоритм $A$ в случае самообучающегося М-автомата не содержит блока 3, а в случае необучающегося — блоков 2 и 3.

Иногда выражение в М-сети отдельных (из множества моделируемых) функций или программ оказывается неэкономичным или связано со значительными техническими трудностями. В этих случаях указанные функции целесообразно описать некоторым специальным алгоритмом (т. е. построить их функциональную модель) и организовать его совместную работу и обмен информацией с алгоритмом $A$. М-автомат, часть функций которого выражена специальным алгоритмом, работающим сопряженно с алгоритмом $A$, назовем *неполным* М-автоматом. Неполный М-автомат является удобной формой сочетания в единой системе функциональных и структурных моделей. В дальнейшем мы будем подробно рассматривать примеры построения неполных М-автоматов.

Для некоторых практических целей представление в моделях системы усиления — торможения не является необхо-

димым. М-автомат, алгоритм $A$ которого не содержит блока СУТ, будем называть *вырожденным* М-автоматом.

*Построение М-автомата.* Пусть поставлена задача построения модели некоторой психической функции $\psi$ и определена цель моделирования. Кратко рассмотрим этапы построения соответствующего М-автомата.

1. Прежде всего собираются и систематизируются сведения из психологии о функции $\psi$. Если необходимо, проводятся новые психологические исследования. 2. Исходя из целей моделирования и сведений п. 1 определяется необходимый тип М-автомата. Если принимается решение о разработке неполного М-автомата, конструируется алгоритмическая модель соответствующих функций. Это может явиться самостоятельной и сложной задачей, рассматривать которую здесь мы не будем. 3. Выдвигается гипотеза о составе программ психики, участвующих в формировании моделируемой функции $\psi$. 4. Исходя из целей моделирования задаются «внешние объекты» и законы их взаимодействия с М-автоматом, т. е. задается среда модели. 5. Определяется «уровень» моделирования. В соответствии с гипотезой п. 3 фиксируется набор понятий, необходимый для описания $\psi$ на выбранном уровне. Каждому понятию ставится в соответствие $i$-модель. 6. В соответствии с гипотезой п. 3 задается множество связей между $i$-моделями. 7. Определяются проходимости связей, вид и параметры характеристик $i$-моделей и связей. Для их уточнения могут понадобиться специальные эксперименты. Однако, как правило, они определяются эвристически. 8. Аналогично определяются (если необходимо) характеристики обучения и самоорганизации. При выполнении пп. 6—8 широко используются аналогии, сопоставления, правдоподобные рассуждения и т. п. Направляющим здесь является содержание гипотезы п. 3. Следует отметить, что от удачного выбора величин в пп. 6 и 7 во многом зависит успех моделирования. Именно здесь прежде всего необходимы дальнейшая систематизация, совершенствование и разработка методов эвристического моделирования. 9. Задается исходное состояние М-сети. 10. Задается алгоритм функционирования $A$. 11. М-автомат и его среда реализуются в виде действующих устройств или программ для ЦВМ.

## § 2. *Пример построения М-автомата*

При описании аппарата моделирования мы перечислили ряд последовательных этапов построения М-автомата. Приведем конкретный пример этого процесса.

В качестве прототипа конструируемого М-автомата рассмотрим робота Спиди — героя рассказа А. Азимова «Хоровод». Читатели, интересующиеся проблемой «искусственный

разум», вероятно, хорошо знакомы с циклом рассказов А. Азимова «Я, робот» («Мир», М., 1959), однако, на всякий случай, процитируем «Три Закона роботехники» и напомним кратко содержание рассказа «Хоровод».

«Три Закона роботехники:

1. Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред.
2. Робот должен повиноваться командам, которые ему дает человек, кроме тех случаев, когда эти команды противоречат Первому Закону.
3. Робот должен заботиться о своей безопасности, поскольку это не противоречит Первому и Второму Законам.

Из «Руководства по роботехнике», 56-е издание, 2058 год».

Робот СПД-13 (Спиди) послан к селеновому озеру с приказом: принести селен. Приказ не подчеркивал важность и срочность этого задания, в то время как именно от его выполнения зависел успех экспедиции. Выделяющийся возле озера газ был опасен для робота, поскольку мог привести к нарушению его целостности. В результате, по мере приближения робота к озеру, в его «позитронном мозге» возрастал потенциал Третьего Закона роботехники, призванного не допускать нарушения целостности робота. Поскольку потенциал Второго Закона, обусловленный силой данного Спиди приказа, был невелик, возникло равновесие между стремлением выполнить приказ и стремлением избежать опасности. Это и привело к нарушениям в поведении робота:

«—...Устанавливается равновесие. Третий Закон гонит его назад, а Второй — вперед...

— Он начинает кружить около озера, оставаясь на линии, где существует это равновесие. Если мы ничего не предпримем, он так и будет бегать по этому кругу, как в хороводе...»

Только ценой включения Первого Закона, обязующего робота прежде всего заботиться о человеке, удалось вывести Спиди из «заколдованного круга». Вторично робот получил приказ «достаточной силы» и выполнил его без всяких отклонений от норм поведения.

Построим М-автомат, моделирующий поведение Спиди. Итак, моделируемая функция $\psi$ есть поведение робота: цель моделирования — выяснение причин нарушения нормы поведения.

Необходимо иметь в виду, что модель Спиди строится только для демонстрации процесса построения М-автомата. Поведение Спиди будет представлено в предельно упрощенном виде, поскольку для сложного автомата детальный анализ принципов построения весьма затруднителен. Именно поэтому мы, собственно, и рассматриваем условный пример,

а не используем разработанные нами М-автоматы, описание которых приводится во второй части книги.

Будем считать, что полученный роботом приказ выполнен в тот момент, когда он подошел к озеру. Процесс возвращения робота после выполнения задания рассматривать не будем. Пусть выполнение приказа считается нормой поведения, а блуждания вокруг озера — нарушением нормы. Сведениями о функции $\psi$ будут служить описания поведения робота, приведенные в рассказе. Дополнительные исследования, естественно, мы провести не можем. Поскольку поведение робота ограничено в нашей модели только движением к озеру, можно считать, что имеющиеся в рассказе сведения достаточны для построения полного необучающегося М-автомата.

В построении моделируемой функции участвуют две программы, отражающие действие Второго и Третьего Законов роботехники: программа выполнения приказа и программа сохранения целостности робота. В качестве «внешних» объектов примем: озеро, содержащее селен (автомат должен приблизиться к нему), и газ, выделяющийся вокруг озера и угрожающий целостности автомата. Будем считать, что концентрация газа находится в прямой зависимости от близости автомата к озеру: чем больше концентрация газа, тем больше опасность для автомата. Внешним воздействием (установкой) будем считать также «силу приказа», данного автомату. Поскольку приказ был дан один раз, силу этого внешнего воздействия примем постоянной.

Выберем информационный уровень описания работы мозга робота и определим набор понятий, необходимых для описания функции. Прежде всего зафиксируем отражение в мозге робота внешних воздействий, введя $i$-модели «близость озера», «концентрация газа» и «приказ». Для того чтобы выполнить приказ и в то же время сохранить себя, автомат должен совершать некоторые действия. Чтобы не усложнять структуру будущего М-автомата, ограничимся двумя действиями — «подойти» и «отойти» и введем соответствующие $i$-модели. Тот факт, что в среде имеются опасные для целостности автомата элементы, отразим $i$-моделью «опасность».

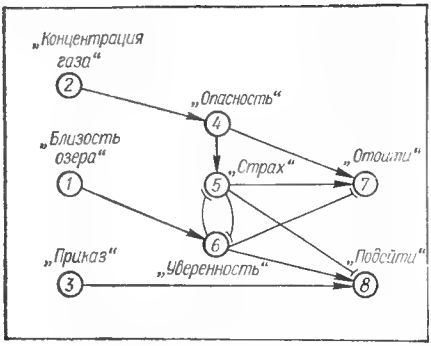
«Эмоциональное» состояние робота во время выполнения приказа в самых общих чертах может быть описано следующим образом. Поскольку среда в определенной мере опасна для робота (и, соответственно, для моделирующего его автомата), эмоциональным сигналом о наличии опасности может быть чувство страха. С другой стороны, процесс выполнения полученного приказа должен сопровождаться чувством удовлетворения (сигнал полезности деятельности), а отказ от выполнения — чувством неудовлетворения. Чувство удовлетворения можно интерпретировать и по-другому, понимая

его в данном случае как чувство уверенности, возрастающее по мере приближения к цели. Чувством неудовлетворения мы пока пренебрежем. Понимая, что эмоциональная сфера нашего автомата оказывается бедной, ограничимся все же введением в нее не более двух *i*-моделей: «чувство страха» и «чувство уверенности». На этом закончим формирование набора понятий для описания поведения робота Спиди. При желании читатель может легко расширить структуру автомата, введя новые понятия самостоятельно.

Итак, для описания выбранной функции $\psi$ мы собираемся использовать следующие понятия: близость озера, концентрация газа, опасность, страх, уверенность, подойти, отойти. Очевидно, что соответствующие *i*-модели должны быть в мозге автомата определенным образом взаимосвязаны. Мы говорили, что концентрация газа находится в прямой зависимости от близости озера. Однако отражать эту зависимость связью от *i*-модели «близость озера» к *i*-модели «концентрация газа» не следует, поскольку, во-первых, она реализуется вне автомата, его внешней средой, и, во-вторых, «по условиям игры» наш автомат не обучается, никогда раньше к этому озеру не подходил и, следовательно, в его мозге не могла установиться такая связь. Тот факт, что наличие газа и величина его концентрации не безразличны автомату, отразим связью, направленной от *i*-модели «концентрация газа» к *i*-модели «опасность». Естественно, что чем больше опасность, тем сильнее должно быть чувство страха и стремление автомата уйти от опасности. Установим поэтому связи от *i*-модели «опасность» к *i*-моделям «страх» и «отойти». Увеличение чувства страха, в свою очередь, пусть вызывает стремление уйти от опасности, уменьшение уверенности и стремления подойти к опасному объекту. Отразим эти взаимозависимости связями, направленными от *i*-модели «страх» к *i*-модели «отойти» и *i*-моделям «уверенность» и «подойти». К последним *i*-моделям должны быть установлены тормозные связи.

При описании аппарата моделирования мы выделяли тормозный и активный компоненты связи. Поскольку здесь мы имеем дело с необучающимся М-автоматом, а также для упрощения его алгоритма будем считать, что связь имеет только один компонент и, следовательно, может быть либо усиливающей (активной), либо тормозной. Говоря, что от одной *i*-модели к другой установлена связь, будем понимать, что эта связь усиливающая. Наличие тормозной связи будем каждый раз оговаривать отдельно.

Итак, чувство страха тормозит чувство уверенности. Вполне оправдано установление и обратной тормозной связи — от *i*-модели «уверенность» к *i*-модели «страх». Установим также связь от *i*-модели «близость озера» к *i*-модели



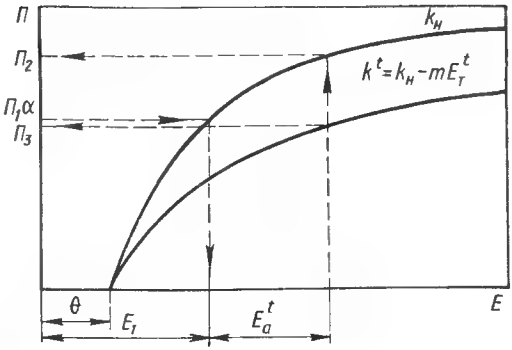




Рис. 1. М-сеть автомата «Спиди».

Рис. 2. Характеристика возбуждения *i*-моделей.

«уверенность», отразив тем самым потенциальную возможность роста уверенности в выполнении приказа по мере приближения к цели, и связь от *i*-модели «приказ» к *i*-модели «подойти», поскольку в рамках нашего, уже ограниченного, сюжета модели именно в выполнении действия «подойти» к озеру заключается смысл приказа. Влияние «уверенности» на процесс выполнения задания отразим связью от *i*-модели «уверенность» к *i*-модели «подойти».

На этом закончим формирование структуры автомата, предположив, что в таком виде она должна обеспечивать выполнение функции ψ. Структура автомата показана на рис. 1. Естественно, у читателя могут возникнуть вопросы относительно правомерности и обоснованности выбора именно этой структуры. Кроме тех оправданий и объяснений, которые мы уже приводили, можно еще добавить, что набор *i*-моделей и, особенно, связи между ними — это наши «микрогипотезы» относительно структуры моделируемой деятельности. Эксперимент с действующей моделью покажет их правомерность. Не нужно забывать также, что модель строится для получения именно функции ψ и возможные психологические несоответствия или отсутствие веских обоснований не должны нас смущать, ибо девиз искусственного разума — «важнее всего результат».

Следующий этап построения М-автомата — определение проходимостей связей и вида характеристик *i*-моделей. К сожалению, этот этап находится пока на уровне, если можно так выразиться, искусства, ибо ничего более веского и убедительного, чем правдоподобные рассуждения, здесь предложить нельзя. Мы говорим — пока, потому что надеемся, что со временем будет найден более конструктивный способ задания организации М-автоматов, хотя бы в виде четко сформулированных эмпирических правил.

Начнем с определения вида характеристик $i$-моделей. Напомним, что для каждой $i$-модели нужно задать характеристики возбуждения, торможения и затухания и, кроме того, порог возбуждения.

В принципе, для различных $i$-моделей характеристики могут иметь разный вид, например: для характеристики возбуждения может быть принят логарифмический, линейный или любой другой вид. В больших М-сетях $i$-модели можно разделять на группы, задавая каждой свой вид характеристик или свои параметры характеристик при одинаковом их виде. Выделение таких групп позволяет более полно отразить специфику входящих в сеть $i$-моделей. Возможности для воспроизведения М-сетью сложных и разнообразных функций, вытекающие из раздельного задания вида и параметров характеристик отдельных $i$-моделей, весьма велики, поскольку существенно увеличивается «гибкость» модели в целом.

В нашем примере М-сеть невелика и можно ограничиться одинаковым видом характеристик для всех $i$-моделей сети. Прежде всего рассмотрим происходящий в $i$-модели процесс трансформации усиливающих входных сигналов в выходной. Рис. 2 демонстрирует общий вид зависимости возбужденности П на выходе $i$-модели от усиливающих входных возбуждений $E_a$ (характеристика возбуждения). Если вернуться к аналогии между $i$-моделью и нейронным ансамблем, то такой вид зависимости представляется достаточно естественным. Действительно, при малых входных воздействиях ансамбль не возбуждается, а затем возбужденность на выходе увеличивается пропорционально величине входного воздействия. При достаточно больших входных воздействиях возбужденность на выходе должна изменяться мало, поскольку клетки ансамбля не могут импульсировать с большей, чем это следует из их физиологии, частотой и, кроме того, количество клеток в ансамбле конечно. Поэтому близкий к логарифмическому вид характеристики возбуждения представляется вполне приемлемым. Запишем его следующим образом:

$$\Pi^{t+1} = K_{\text{н}} \ln (E_a^t - \Theta), \tag{4.15}$$

где $K_{\text{н}}$ — коэффициент, определяющий крутизну характеристики, или, иначе, возбудимость $i$-модели.

Определение возбужденности $i$-модели по характеристике, показанной на рис. 2, возможно только в том случае, если в предыдущий момент $i$-модель не была возбуждена и если на вход приходят только усиливающие воздействия. Однако реально чаще всего бывает наоборот, т. е. существуют и собственное (за предыдущий момент) возбуждение, и тормозные воздействия.

Характеристика затухания определяет изменение собственного возбуждения $i$-модели во времени. Примем следующий вид характеристики:

$$\Pi^{t+1} = \Pi^t \alpha, \tag{4.16}$$

где $\alpha$ — коэффициент затухания. Посмотрим, каким образом может быть определено выходное возбуждение $i$-модели при наличии собственного возбуждения и усиливающих входных воздействий. Пусть в момент $t$ $i$-модель была возбуждена до величины $\Pi_1$. Если бы входных воздействий не было, то в момент $t+1$ возбужденность этой $i$-модели составила бы $\Pi^{t+1} = \Pi_1\alpha$. В «пересчете на вход» это соответствует входному воздействию $E_1$ в момент времени $t$ (см. рис. 2). Пусть в этот же момент $t$ на вход $i$-модели поступило активное воздействие $E_a$. Сумма $E_1$ и $E_a$ за вычетом величины порога $\Theta$ и определяет возбужденность $i$-модели в момент $t+1$. Из приведенных выше рассуждений и логарифмического характера кривой возбуждения следует, что $E_1 = e^{\frac{\Pi_1\alpha}{K_н}}$. Таким образом, при отсутствии тормозных воздействий

$$\Pi^{t+1} = K_н \ln\left(E_a^t + e^{\frac{\Pi^t\alpha}{K_н}} - \Theta\right). \tag{4.17}$$

Теперь остается только разобраться с процессом торможения. Как было описано при изложении аппарата моделирования, логичнее всего (разумеется, по нашему мнению) отражать тормозное воздействие изменением возбудимости $i$-модели, т. е. коэффициента наклона ее характеристики возбуждения. Именно поэтому мы приняли следующий вид характеристики торможения:

$$K^t = K_н - mE_т^t, \tag{4.18}$$

где $E_т$ — тормозные входные воздействия, $K_н$ — начальная возбудимость $i$-модели, $m$ — масштабный коэффициент. На графике рис. 2 это соответствует окончательному определению возбужденности рассматриваемой $i$-модели не по кривой $K_н$, а по кривой $K^t$. Итак, общий вид зависимости выходного возбуждения $i$-модели от всех входных воздействий может быть представлен следующим образом:

$$\Pi^{t+1} = (K_н - mE_т^t)\ln\left(E_a^t + e^{\frac{\Pi^t\alpha}{K_н}} - \Theta\right). \tag{4.19}$$

Коэффициент $m$ необходим для сохранения нужного масштаба числовых величин.

Несмотря на бо́льшую обоснованность выбора логарифмического вида характеристики возбуждения, для рассматриваемого примера, с целью упрощения расчетов, выберем

все же линейный вид этой зависимости. Дело в том, что автомат, моделирующий робота Спиди, мы решили полностью просчитать «вручную», чтобы читатель, интересующийся такого типа автоматами, легко мог повторить этот расчет и приобрести тем самым минимальный практический навык, необходимый при создании эвристических моделей. Это обстоятельство сыграло не последнюю роль и в других упрощениях, принятых при конструировании автомата.

Окончательно примем для всех $i$-моделей рассматриваемой сети характеристики затухания, торможения и возбуждения соответственно в виде:

$$\Pi^{t+1} = \Pi^t \alpha,$$

$$K^t = K_н - mE_т^t;$$

$$\Pi^{t+1} = (E_a^t - \Theta) K_н.$$

Величины активных и тормозных воздействий на $i$-модель будем подсчитывать следующим образом:

$$E_а^t = \sum_{j=1}^{n} (\Pi_j^t r_{ij}), \quad E_т^t = \sum_{j=1}^{n} (\Pi_j^t \tilde{r}_{ij}), \tag{4.20}$$

где $r_{ij}$ и $\tilde{r}_{ij}$ — активные и тормозные связи соответственно. Общая зависимость (формула пересчета) выходного возбуждения $i$-модели от всех входных воздействий имеет вид

$$\Pi^{t+1} = (K_н - mE_т^t)\left(E_а^t + \frac{\Pi^t \alpha}{K_н} - \Theta\right). \tag{4.21}$$

Зададим конкретные значения параметров введенных характеристик, прежде всего — величины внешних воздействий, т. е. возбужденности $i$-моделей «сферы восприятия». Чтобы не писать каждый раз наименование (содержательную интерпретацию) $i$-моделей, будем в дальнейшем пользоваться их номерами, приведенными на рис. 1. Итак, определим возбужденности $i$-моделей 1—3.

Будем считать, что сила данного автомату приказа остается для него постоянной до момента достижения цели (в нашем примере — подойти к озеру). Соответственно постоянной и независимой от положения автомата относительно озера будем считать возбужденность $i$-модели 3. Пусть эта возбужденность будет равна 30 *усл. ед.* Вообще говоря, цифру 30 мы взяли произвольно и в дальнейшем «силу приказа» будем изменять, чтобы продемонстрировать ее влияние на выполнение автоматом задания.

Изменение возбужденностей $i$-моделей 1 и 2 должно соответствовать состоянию среды и находится в прямой зависимости от положения автомата относительно озера.

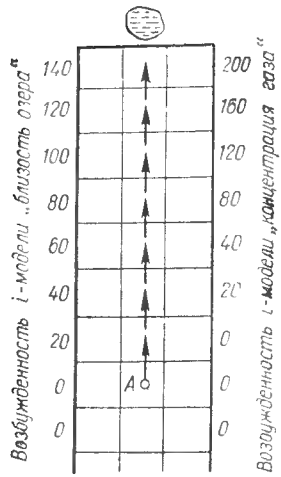



Рис. 3. Структура среды М-автомата «Спиди».

На рис. 3 приведены принятые числовые величины возбужденностей $i$-моделей при каждом конкретном положении автомата.

Поскольку величины внешних воздействий и, следовательно, возбужденности $i$-моделей 1—3 уже известны, постараемся задать необходимые параметры так, чтобы возбужденности остальных $i$-моделей были того же порядка. Это необходимо для обеспечения нормального переключения СУТ с одних $i$-моделей на другие. Будем ориентироваться на среднюю возбужденность $\Pi_i = 100$ *усл. ед.*

Примем коэффициент затухания для $i$-моделей 4—6 $\alpha = 0{,}5$. Тем самым мы задаем «кратковременную память» автомата, достаточную для влияния в течение двух-трех последующих моментов времени. Что же касается «рецепторных» и «эффекторных» $i$-моделей 1—3, 7, 8, то здесь «забывание» пришедшей от сети информации нецелесообразно. Поэтому примем для них $\alpha = 1$.

Перейдем теперь к определению коэффициентов возбудимости $i$-моделей $K_н$. Рассматриваемая нами сеть настолько мала, что нет причин для задания различных значений $K_н$ для разных $i$-моделей. Определим порядок величины $K_н$. Входное воздействие по активным связям в среднем составляет в нашей сети для одной $i$-модели 200 *усл. ед.* Цифра получена следующим образом. Пусть на $i$-модель приходит 3—5 связей. При средней возбужденности 100 *усл. ед.* и связях $r_{ij} = 0{,}5$ средняя величина $E_a = \sum_{j=1}^{4} \Pi_j r_{ij} = 200$. Примем, что значение $\frac{\Pi_i \alpha}{K_н}$ примерно на порядок меньше $E_a$, и, сле-

довательно, новая информация (новые воздействия) имеет большее влияние на состояние $i$-модели, чем память о прошлых воздействиях. Поскольку $\Pi_i \alpha = 100 \cdot 0{,}5 = 50$ *усл. ед.*, величина $K_н$ должна быть близкой к единице. Примем $K_н = 1{,}5$ для $i$-моделей 4—8 и $K_н = 1$ для «рецепторных» $i$-моделей 1—3. Пусть коэффициент пропорциональности обеспечивает превышение $K_в$ относительно $mE_т$ примерно на порядок. Примем $m = 0{,}01$. В нашей схеме на $i$-модель приходит не более одной тормозной связи, следовательно, в среднем $E_т = 100 \cdot 0{,}5 = 50$ *усл. ед.* и $mE_т = 0{,}5$, т. е. такая величина $m$ нас устраивает.

Отметим, что если выражение $K_н - mE_т$ принимает значение $K_н - mE_т \leqslant \Theta$, то считается, что $i$-модель полностью заторможена и ее возбужденность равна нулю.

Допущения типа «величина $A$ должна быть на порядок больше величины $B$» носят эвристический характер и могут уточняться в процессе работы с моделью.

Итак, мы задали величины параметров $\alpha$, $K_н$, $m$, и в формуле (4.21) остались не зафиксированными только пороги возбуждений $i$-моделей и проходимости связей между ними. Что касается порогов возбуждений, то для упрощения расчетов примем для всех $i$-моделей $\Theta = 0$. Это позволит нам более четко продемонстрировать влияние остальных параметров $i$-моделей на работу М-сети, поскольку возможность реализации достаточно широких функций пороговыми элементами хорошо известна. Правда, в М-сети наличие порогов возбуждений не превращает $i$-модели в пороговые элементы, однако по опыту работы с другими М-автоматами мы знаем, что введение порогов может существенно упростить настройку сети. Поэтому нам кажется интересным при построении «учебной» модели показать работу М-сети со значениями $\Theta = 0$.

Успешность работы модели в значительной мере зависит от задания величин проходимостей связей между $i$-моделями. На рис. 4,*а* показана матрица связей, принятая нами в качестве «начального» варианта. Номера столбцов соответствуют номерам $i$-моделей, от которых отходят связи $j$, номера строк — номерам $i$-моделей, к которым подходят связи $i$. Цифры на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца соответствуют проходимостям связей между $i$-моделями. Тормозные связи показаны со знаком тильды.

Постараемся теперь пояснить, как и почему была выбрана именно эта матрица связей. Поскольку специальных экспериментов по выявлению «силы» определенных связей мы не проводим, ограничимся разделением всех связей на три группы: сильные, средние и слабые. К сильным отнесем следующие: связь от $i$-модели «приказ» к $i$-модели «подойти», связь от $i$-модели «близость озера» к $i$-модели «уверен-

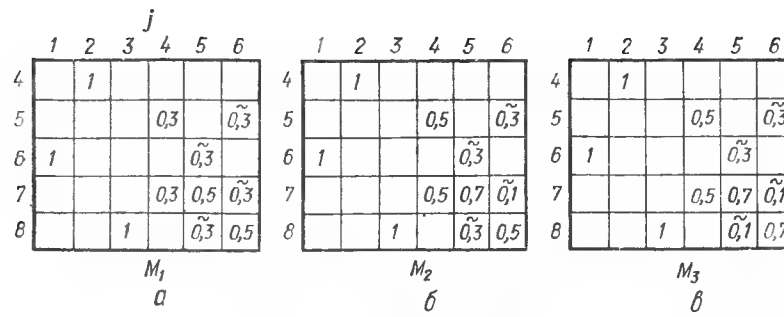



Рис. 4. Проходимости связей М-сети.

ность» и связь от $i$-модели «концентрация газа» к $i$-модели «опасность». Зададим величину проходимостей этих связей $r_{83} = r_{42} = r_{61} = 1$. Связи от $i$-моделей 5 и 6 к $i$-моделям 7 и 8 соответственно отнесем к «средним» и установим $r_{86} = r_{75} = 0{,}5$. Остальные связи отнесем к группе «слабых», и их проходимости зададим равными 0,3.

Установлением определенных связей, заданием параметров характеристик и величин проходимостей связей мы задаем определенный «характер» модели. Легко видеть, например, что, повысив величину связи от $i$-модели «опасность» к $i$-модели «страх», мы сделаем автомат более «пугливым». Аналогичного эффекта можно добиться, повысив коэффициент возбудимости $i$-модели «страх» или $i$-модели «опасность». Таким образом, изменяя значения параметров отдельных элементов М-сети, мы можем получить не один, а множество автоматов, по-разному ведущих себя в одной и той же среде. Среди этих автоматов мы должны получить и такой, который в общих чертах воспроизводит поведение Спиди.

Известно, что на поведение моделируемого нами робота Спиди влияла не только внешняя информация, но и сила задания Второго и Третьего Законов роботехники (предорганизация). В М-сети нашей модели Второй Закон отражен параметрами $i$-моделей 3, 6, 8 и величинами проходимостей связей от $i$-моделей 3, 5, 6 к $i$-модели 8. Третий Закон отражен параметрами $i$-моделей 4, 5, 7 и величинами проходимостей связей от $i$-моделей 4, 5, 6 к $i$-модели 7 и от $i$-модели 4 к $i$-модели 5. Как видно из матрицы связей, связи Второго и Третьего Законов заданы пока одинаковыми, хотя известно, что у Спиди Третий Закон был задан особенно сильно. Такое начальное «уравнивание» связей в М-сети сделано преднамеренно для того, чтобы исследовать общие свойства модели и проверить совместную работу всех принятых параметров. В дальнейшем, изменяя значения отдельных параметров сети, мы продемонстрируем их влияние на поведение модели.

Следующий этап построения М-автомата — задание исходного состояния сети. В принципе, мы можем задать любое распределение возбуждений на $i$-моделях сети, исходя из принятого ранее среднего значения возбужденности $i$-модели $П_{ср} = 100$ *усл. ед.* Этим мы задали бы «временную память» модели о ее прошлом опыте. Однако, поскольку такая «память» была бы очень произвольна, а в нашей модели элементов произвольности и так достаточно, пусть она «начинает жизнь» с нуля. Собственно, не совсем с нуля, поскольку постоянная память зафиксирована в связях; однако временную память, т. е. возбужденность $i$-моделей, примем в исходном состоянии нулевой.

Таким образом, наша модель представлена в виде М-сети. Для того чтобы она стала М-автоматом, т. е. действующей моделью, необходимо задать алгоритм функционирования М-сети и правила взаимодействия модели со средой. Основным процессом в М-сети является передача возбуждения между $i$-моделями. Пусть наша модель работает в дискретном времени, момент которого будем называть тактом. Совокупность операций по определению возбужденностей $i$-моделей сети в момент $t + 1$ по их возбужденностям в момент $t$ будем называть пересчетом. Зависимость (4.21) примем в качестве формулы пересчета.

Если бы мы строили обучающуюся модель, то в алгоритм функционирования М-сети необходимо было бы включить также правила установления новых связей и изменения их проходимостей. В нашем же случае матрица связей постоянна во время эксперимента с моделью, и, таким образом, нам остается только определить правила работы системы усиления — торможения на М-сети. Примем одноуровневую СУТ, работающую на всех $i$-моделях сети. Пусть СУТ выбирает наиболее возбужденную $i$-модель и увеличивает дополнительно ее возбуждение на 30 *усл. ед.* В следующий такт времени для этой $i$-модели изменим коэффициент затухания ($\alpha' = \alpha - 0{,}3$) и коэффициент возбудимости ($K_{п}^{1} = K_{п} - 0{,}3$). Такое уменьшение $\alpha$ и $K_{п}$ у выбранной $i$-модели должно происходить каждый такт до того момента, пока СУТ не выберет другую $i$-модель. Так, например, если $i$-модель А в момент $t_1$ имела возбужденность $П = 150$ ($\alpha = 0{,}8$; $K_{п} = 1{,}5$) и была выбрана СУТ, то ее параметры должны изменяться следующим образом. В момент $t_1$ $П = 180$, $\alpha = 0{,}8$; $K_{п} = 1{,}5$; в момент $t_2$ $П = X_1$ (зависит от связей А с остальной сетью), $\alpha = 0{,}5$, $K_{п} = 1{,}2$; в момент $t_3$ $П = X_2$, $\alpha = 0{,}2$, $K_{п} = 0{,}9$ и т. д. до тех пор, пока СУТ не выберет $i$-модель В. Начиная с этого момента $\alpha$ и $K_{п}$ $i$-модели А принимают начальное значение $\alpha = 0{,}8$; $K_{п} = 1{,}5$. Если в какой-то момент оказывается, что $\alpha < 0$ или $K_{п} < 0$, то принимается $\alpha = 0$ и $K_{п} = 0$. В том случае, если СУТ выбирает

более одной $i$-модели (при равной их возбужденности), дополнительное возбуждение $П_д = 30$ *усл. ед.* распределяется на эти $i$-модели равномерно.

При выборе СУТ одной из $i$-моделей действий (7 или 8) автомат должен быть перемещен в среде в соответствии с этим действием. Перемещение в среде означает для него изменение возбужденностей «рецепторных» $i$-моделей 1 и 2 в соответствии с новым положением (см. рис. 3). Среду будем представлять в виде совокупности квадратных клеток. Тогда каждый шаг будет перемещать модель в одну из соседних клеток. Поскольку у нас введено только два действия, будем считать, что действие «подойти» перемещает модель на одну клетку «вверх», а действие «отойти» — на одну клетку «вниз». При одновременном выборе СУТ обоих действий будем считать, что решение не принято и автомат остается на месте. После выполнения одного действия считаем, что возбужденность обоих действий снижается до нуля.

Итак, заданы М-сеть и алгоритм ее функционирования. Теперь наша модель представляет собой полный необучающийся М-автомат, помещенный в среду, показанную на рис. 3; можно переходить к его экспериментальному исследованию. Поставим себя на место разработчиков робота СПД-13 фирмы «Ю. С. Роботс», получивших рекламацию на свою продукцию. Естественно, прежде всего нужно найти причину, вызвавшую рассогласование в работе Спиди, и попытаться ее устранить. Затем следует проверить, как будет себя вести такой «скорректированный» робот, и внести окончательные исправления в его конструкцию или в инструкции пользования.

Первая рабочая гипотеза относительно причин нарушения нормы поведения Спиди была сформулирована его испытателями «на месте аварии»: робот получил приказ «малой силы»; из-за опасности окружающей среды он не мог

Рис. 5. Блок-схема алгоритма функционирования М-автомата.

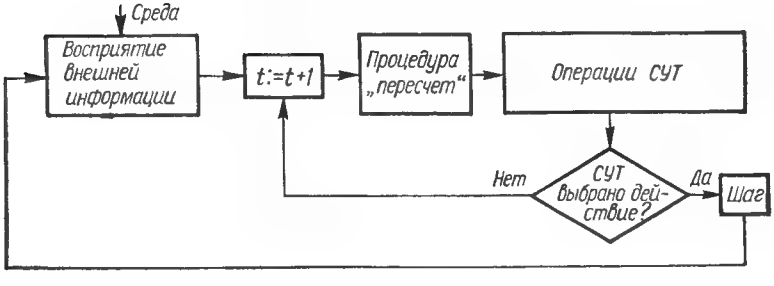


Таблица 1

| T | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ | $t_8$ | $t_9$ | $t_{10}$ | $t_{11}$ | $t_{12}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 20 | 40 | 40 | 60 | 60 | 80 | 80 | 100 | 120 | 120 | 140 |
| 2 | 0 | 0 | 20 | 20 | 40 | 40 | 80 | 80 | 120 | 160 | 160 | 200 |
| 3 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 4 | 0 | 0 | 30 | 45 | 83 | 102 | 200 | 130 | 276 | 189 | 362 | 250 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 11 | 21 | 33 | 48 | 70 | 62 | 94 | 76 | 115 |
| 6 | 0 | 30 | 105 | 73 | 155 | 100 | 158 | 165 | 200 | 216 | 238 | 250 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 44 | 55 | 63 | 74 | 148 | 90 | 174 |
| 8 | 45 | 45 | 68 | 190 | 100 | 152 | 112 | 200 | 146 | 318 | 170 | 330 |
| | ↑ | ↑ | | ↑ | | ↑ | | ↑ | | ↑ | | ↑ |

выполнить приказ, но, в то же время, не мог от него отказаться. Эта гипотеза хорошо объясняет поведение робота, однако, как и всякая гипотеза, должна быть проверена. Необходимо выяснить, может ли в принципе эффективно функционировать робот с усиленным действием Третьего Закона, если в конструкции робота не предусмотрена возможность отказа от выполнения задания задолго до того, как выйдут из строя системы контроля адекватности. Сделаем такую проверку следующим образом. Проведем предварительное исследование автомата, моделирующего Спиди. Настроим автомат так, чтобы его поведение совпадало с поведением робота в аварийной ситуации и, изменяя «силу приказа», посмотрим, как влияет приказ на выполнение задания.

Начнем предварительное исследование автомата. На рис. 5 показана блок-схема алгоритма его функционирования. Выпишем еще раз все параметры, необходимые для расчета состояния сети.

Для $i$-моделей 1—3 $\alpha = 1$, $K_н = 1$; 4—6 — $\alpha = 0{,}5$, $K_н = 1{,}5$; 7,8 — $\alpha = 1$, $K_н = 1{,}5$.

Для всех $i$-моделей $\Theta = 0$, $П_д = 30$ *усл. ед.* Напомним также, что после выбора $i$-модели системой усиления — торможения ее параметры изменяются так: $\alpha = \alpha - 0{,}3$; $K_н = K_н - 0{,}3$.

Будем использовать матрицу связей, приведенную на рис. 4, *а*. Обозначим ее через $М_1$. Результаты расчета состояний М-сети, имеющей приведенные выше значения параметров, представлены в табл. 1. Стрелками отмечены мо-

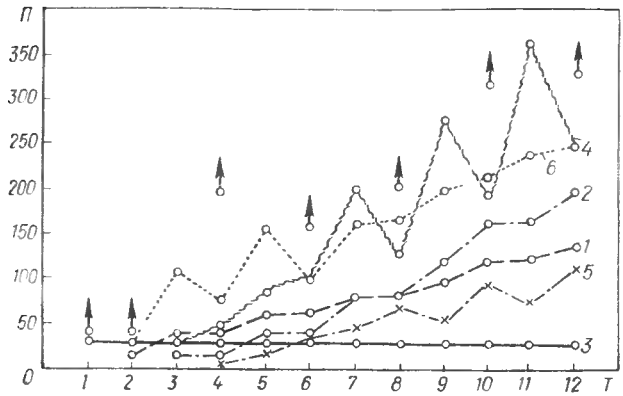



Рис. 6. Внутренние реакции «Спиди» с матрицей связей $M_1$.

менты выполнения действий-шагов. Графически изменения возбужденностей $i$-моделей показаны на рис. 6 (кривые построены по данным табл. 1). Положение стрелок на графике соответствует значениям возбужденностей $i$-моделей действий и направлению выполненных автоматом шагов.

Ход кривых показывает изменения внутренних реакций автомата в процессе его движения к озеру. Так, в течение первых шести тактов доминирующим было чувство уверенности. За это время автомат сделал четыре шага и оказался на таком расстоянии от озера, что возбужденности $i$-моделей 1 и 2 стали равными. Теперь уже автомат преимущественно «думает» об «опасности», хотя чувство «уверенности» остается достаточно сильным и «осознается» в моменты $t_8$ и $t_{10}$. В целом приближение к озеру оценивается как опасное, что и выражается в росте возбужденности $i$-модели «страх».

Рассмотрим более подробно несколько начальных тактов расчета состояний М-сети автомата.

*Такт 1.* Возбуждена только $i$-модель «приказ»: $П_3 = 30$. По формуле пересчета (4.21) считаем воздействие $i$-модели 3 на $i$-модель 8:

$$П_8 = (1{,}5 - 0{,}01 \cdot 0) \cdot \left(\frac{0 \cdot 0{,}5}{1{,}5} + 30 - 0\right) = 45.$$

Поскольку от $i$-модели 3 связь идет только на $i$-модель 8, остальные $i$-модели сети возбуждения не получают. Итак, в сети после пересчета $П_3 = 30$ («приказ» имеет постоянное возбуждение) и $П_8 = 45$. СУТ выбирает $i$-модель 8 и выполняет шаг «подойти». Автомат перемещается на одну клетку вверх и воспринимает «озеро» с интенсивностью 20. Концентрация газа равна нулю.

*Такт 2.* Возбуждены *i*-модели «близость озера»: $П_1 = 20$ и «приказ»: $П_3 = 30$. Напомним еще раз, что после шага возбужденность обоих действий снижается до нуля. Поэтому $П_8 = 0$. Производим пересчет по формуле (4.21). В результате получаем: $П_1 = 20$, $П_3 = 30$, $П_6 = 30$, $П_8 = 45$. СУТ выбирает *i*-модель, имеющую наибольшую возбужденность, т. е. опять действие «подойти», и автомат перемещается еще на одну клетку вверх. В новом положении он воспринимает «озеро» с интенсивностью 40 и «концентрацию газа» с интенсивностью 20.

*Такт 3.* После шага и восприятия внешней информации выполняется следующее распределение возбуждений: $П_1 = 40$, $П_2 = 20$, $П_3 = 30$, $П_6 = 30$. Производим пересчет и получаем новое распределение возбуждений: $П_1 = 40$, $П_2 = 20$, $П_3 = 30$, $П_4 = 30$, $П_6 = 75$, $П_8 = 68$. СУТ выбирает *i*-модель 6 — «уверенность». Ее возбужденность увеличивается на $П_д$. Новое значение $П_6 = 105$. В предыдущих тактах увеличение возбужденности выбранного действия-шага на $П_д$ не имело смысла, поскольку от *i*-моделей действий не отходит ни одна связь и после выполнения шага, т. е. перед следующим пересчетом возбужденность этих *i*-моделей все равно «сбрасывается».

*Такт 4.* В предыдущем такте шаг не произведен. Поэтому возбужденность *i*-моделей 1 и 2 не изменяется, и возбужденность *i*-модели 8 не «сбрасывается». Таким образом, до пересчета имеем следующее распределение возбуждений: $П_1 = 40$, $П_2 = 20$, $П_3 = 30$, $П_4 = 30$, $П_6 = 105$, $П_8 = 68$. После пересчета: $П_1 = 40$, $П_2 = 20$, $П_3 = 30$, $П_4 = 45$, $П_5 = 11$, $П_6 = 73$, $П_8 = 190$. Напомним, что при определении $П_6$ необходимо на этот раз уменьшить $\alpha$ и $K_п$, поскольку в предыдущем такте эта *i*-модель была выбрана СУТ. На четвертом такте СУТ опять выбирает действие «подойти», и, выполняя его, автомат перемещается вверх.

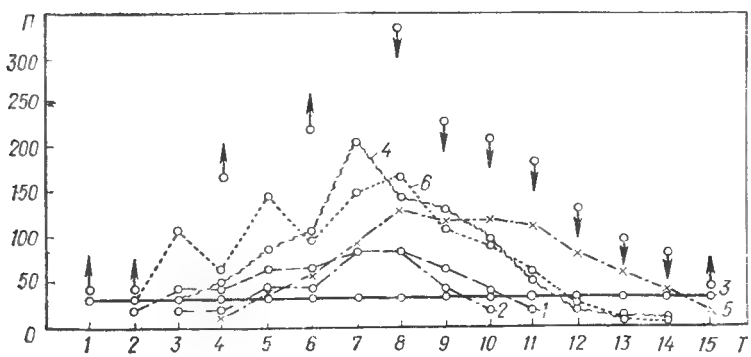
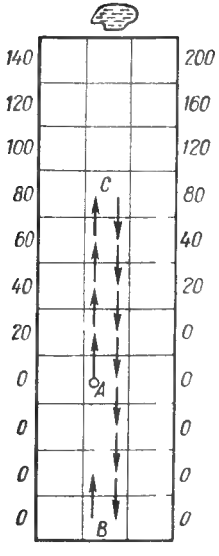



Рис. 7. Внутренние реакции «Спиди» с матрицей связей $М_2$.

На этом закончим подробное рассмотрение расчета состояний сети. Из табл. 1 и рис. 3, иллюстрирующего движение автомата в среде, видно, что автомат доходит до озера, имея приказ $П_3 = 30$ *усл. ед.*

Перейдем теперь к настройке автомата на воспроизведение поведения Спиди. Иначе говоря, нам нужно, чтобы при приказе $П_1 = 30$ *усл. ед.* автомат делал несколько шагов по направлению к озеру, затем возвращался, опять шел к озеру, опять возвращался и т. д. Вспомним, что у Спиди Третий Закон был задан «особенно сильно». В нашем автомате действие этого закона отражено связями $r_{54}$, $r_{74}$, $r_{75}$, $r_{76}$. Увеличим проходимости всех этих связей на 0,2: $r_{54} = 0{,}5$; $r_{74} = 0{,}5$; $r_{75} = 0{,}7$; $r_{76} = 0{,}1$. Новая матрица связей — обозначим ее через $M_2$ — показана на рис. 4, *б*. Посмотрим, как изменится поведение автомата при изменении матрицы связей. Поместим автомат опять в клетку $A$ и проведем расчет изменений состояний сети так же, как и в предыдущем случае. График изменения возбужденностей $i$-моделей приведен на рис. 7. На рис. 8 показана схема движения автомата. Из рисунков видно, что автомат выполнил четыре действия «подойти», затем «осознал опасность» (до этого он чувствовал себя вполне «уверенно» — СУТ выбирала $i$-модель 6) и пошел вниз, выполняя действие «отойти». Через семь шагов представление об опасности и страх были «забыты», и автомат опять повернул вверх — по направлению к озеру. Таким образом, начав движение из клетки $A$, автомат достигает клетки $C$, возвращается, продолжает двигаться вниз



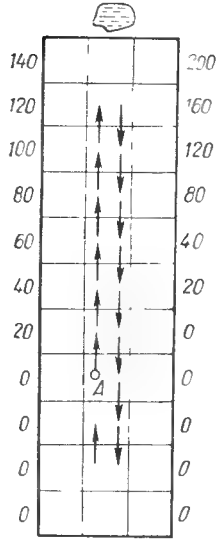




Рис. 8. Схема движения «Спиди» при малой «силе приказа» (30 *усл. ед.*).

Рис. 9. Схема движения «Спиди» при большой «силе приказа» (90 *усл. ед.*).

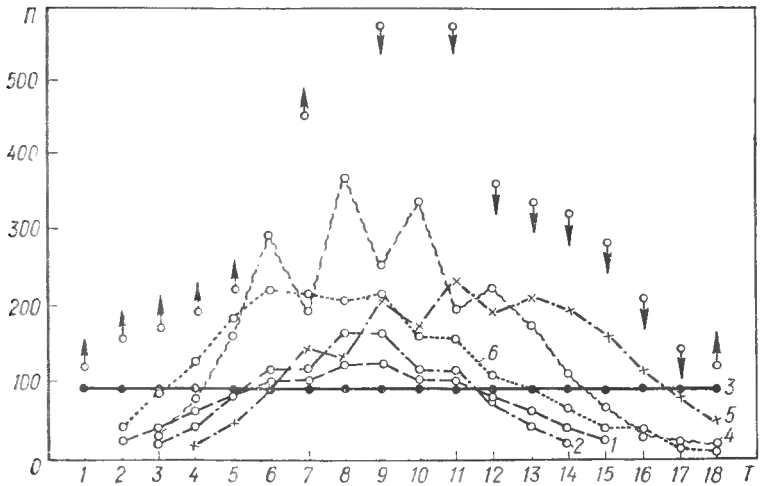



Рис. 10. Внутренние реакции «Спиди» при движении по схеме рис. 9.

до клетки $B$, затем еще раз поворачивает и идет до клетки $C$, из нее возвращается в $B$ и т. д. Поскольку наш автомат не обучается, такое движение может окончиться только благодаря вмешательству извне.

Таким образом, автомат с матрицей связей $M_2$ (с усиленным Третьим Законом) воспроизводит поведение робота Спиди. Теперь мы можем проверить справедливость гипотезы относительно влияния «силы приказа». Увеличим приказ до 90 *усл. ед.* и повторим эксперимент с тем же автоматом. Результат эксперимента показан на рис. 9. При $П_3 = 90$ автомат сделал шесть шагов «подойти», затем восемь шагов «отойти» и опять вошел в «цикл». До озера он не дошел всего один шаг. График внутренних реакций автомата показан на рис. 10.

Увеличим еще раз силу приказа. Пусть $П_3 = 150$. На этот раз автомат делает семь шагов вверх («подойти») и достигает озера. Эксперимент подтвердил гипотезу относительно влияния «силы приказа» на выполнение задания. Следовательно, в конструкции робота с усиленным стремлением к самосохранению должно быть введено усовершенствование, позволяющее ему отказываться от выполнения приказа, если опасность окружающей среды превышает «силу приказа». В противном случае неизбежны ситуации типа «хоровода». Вообще говоря, при отсутствии в конструкции автомата (робота) блока, позволяющего на основе анализа состояния среды принять решение об отказе от выполнения задания, возможны два результата деятельности. Первый — гибель робота при выполнении задания в условиях, опасность

которых превышает допустимые пределы. Второй — ситуация «хоровод». Тот случай, когда опасность в среде невелика, для нас сейчас не представляет интереса. Таким образом, усиленное задание Третьего закона без введения такого «аварийного блока» не имеет смысла.

Посмотрим, однако, нельзя ли ограничиться менее радикальными средствами, т. е. увеличить эффективность данного с «малой силой» приказа путем изменения параметров М-сети автомата. Матрицу связей с усиленным Вторым Законом получим путем изменения матрицы $M_2$. Такая матрица — $M_3$ — показана на рис. 4, *в*. Теперь у автомата усилено действие и Второго и Третьего Законов. Проведем эксперименты с таким автоматом при различных «силах приказа». При силе приказа $П_3 = 30$ *усл. ед.* автомат сделал только четыре шага вверх и повернул назад, т. е. при этой силе приказа он ведет себя так же, как и с матрицей $M_2$. Дадим силу приказа $П_3 = 90$. На этот раз автомат достигает озера, сделав необходимые семь шагов. В предыдущем случае (с матрицей $M_2$) ему это не удалось. Таким образом, у нас получилось усиление действия приказа, «сила» которого уже превышает какое-то минимальное значение. Для «слабых» приказов усиления не произошло. Следовательно, такой способ усовершенствования нельзя признать удовлетворительным. Кроме того, усиливая действие Второго Закона таким путем, мы практически уменьшаем эффективность Третьего Закона во время выполнения роботом какого-либо задания. Наиболее приемлемым в такой ситуации выходом является ввод в конструкцию робота специального «аварийного блока». Для нашего автомата такой блок может быть реализован в виде алгоритма, анализирующего состояние М-сети и среды. Неполный (содержащий и М-сеть, и упомянутый алгоритм) М-автомат будет способен к организации более эффективного поведения.

Подводя итог проведенным экспериментам с моделью робота Спиди, можно сделать следующие выводы: 1) усиление действия Третьего Закона действительно заставляет робота уклоняться от опасных воздействий среды, однако без принятия специальных мер такой робот не может быть эффективно использован в сложных условиях; 2) усиление действия Второго Закона является менее эффективным, чем ослабление действия Третьего Закона; 3) необходимы специальные изменения конструкции робота для согласования действия Второго и Третьего Законов роботехники.

Такие выводы могли бы сделать роботехники фирмы «Ю. С. Роботс», ответственные за модель СПД-13. Мы же только выразим надежду, что, во-первых, пример, а следовательно, и принцип построения М-автомата изложен достаточно понятно и, во-вторых, исследование и использование

М-автоматов в качестве вычислительных прототипов будущих роботов позволит нам хоть немного приблизиться к созданию разумных устройств типа робота Спиди.

## § 3. *Процессы в М-сети и психические процессы. Некоторые аналогии*

При разработке искусственных систем, способных функционально заменить человека в сложных и неблагоприятных для него условиях, чрезвычайно важно как можно полнее использовать данные психологии — науки, в рамках которой ведутся систематические исследования законов целесообразной деятельности и мышления человека. Эффективность применения психологических данных при построении систем ИР в значительной мере определяется возможностью установления взаимных соответствий между терминами и понятиями описания искусственных систем и терминами и понятиями психологии. Важно при этом, чтобы такая взаимная интерпретируемость существовала не только между элементарными, базовыми понятиями обоих языков, но и между более сложными процессами и феноменами, порождаемыми и моделируемыми психическими процессами и феноменами. Действительно, в большинстве случаев результаты психологических исследований могут быть описаны лишь в таких терминах и понятиях, которые сами являются названиями весьма сложных процессов. Поэтому для конструктивного использования таких описаний при разработке ИР необходимо, чтобы возможность интерпретаций существовала на различных уровнях рассмотрения систем обоих типов.

Подчеркнем еще раз следующую особенность нашего обсуждения. От устанавливаемых в дальнейшем аналогий мы требуем эффективности лишь «в одну сторону»: от психологии — к проблеме ИР. Благодаря этому мы можем при построении автоматов применять многочисленные качественные гипотезы и фактические данные психологии. Можно было бы ожидать, конечно, что найденные соответствия будут иметь и «обратную силу», что позволило бы рассматривать действующие модели в качестве «машинных доказательств» тех или иных психологических гипотез. К сожалению, дело таким образом не обстоит. Прежде всего это связано с тем обстоятельством, что при построении систем ИР мы используем не только психологические аналогии и обоснования, но также и чисто искусственные приемы и эвристики. Превращение моделей ИР в «психологические» модели связано с наложением на процесс моделирования ряда специальных требований и ограничений, не являющихся предметом рассмотрения в данной книге. Поэтому и обсуждаемые

в дальнейшем соответствия носят в определенной мере условный характер. По отношению к внутренним задачам психологии они, однако, обладают и некоторым положительным значением, демонстрируя то интересное, на наш взгляд, обстоятельство, что предлагаемый язык моделирования может послужить основанием для разработки гибкого и конструктивного языка собственно психологических описаний.

При описании М-сети как языка моделирования мы уже зафиксировали ряд интерпретаций его основных понятий. Так, *i*-модель сопоставлена с корковой информационной моделью, и, следовательно, каждой *i*-модели соответствует определенный образ или понятие. Взаимосвязям между различными образами и понятиями в системе образов и понятий человека мы ставим в соответствие связи между *i*-моделями. Кроме того, мы проводим аналогию между ролью СУТ в процессах функционирования М-сети и ролью внимания в процессах переработки информации мозгом.

В настоящем разделе, основываясь на уже введенных интерпретациях, продемонстрируем возможности соотнесения различных по сложности процессов в М-сети психологическим процессам. При этом остановимся на рассмотрении только тех соответствий, которые могут облегчить понимание и интерпретацию результатов экспериментального исследования М-автоматов, описываемых в последующих разделах книги.

**Сознание и подсознание.** Законы функционирования М-сети обеспечивают ее постоянную активность: в каждый момент времени возбуждена практически вся сеть. При этом различные *i*-модели возбуждены по-разному, и возбужденность каждой из них изменяется во времени в зависимости от параметров ее собственных характеристик и воздействий со стороны других *i*-моделей. Наиболее возбужденные *i*-модели выделяются СУТ, и их активность временно усиливается. Остальные *i*-модели сети притормаживаются. Это торможение не прекращает полностью процессов передачи возбуждения между не выделенными СУТ *i*-моделями, а лишь снижает общий уровень их активности. В целом картина напоминает непрерывно изменяющийся рельеф, в котором горы и долины «воздействуют» друг на друга. В каждый данный момент одна вершина намного выше других и некоторые из них она усиливает. Еще какие-то усиливаются действием извне. Наиболее возбужденная вершина постепенно понижается, а остальные растут. И как только какая-то другая вершина стала выше, она усиливается еще больше и становится доминирующей, чтобы через мгновение снова начать понижаться. И так происходит постоянно.

Таким образом, можно выделить два уровня процессов переработки информации в М-сети. Один из них представлен

*i*-моделями, выделяемыми СУТ. Активность таких *i*-моделей велика, и они оказывают доминирующее влияние на ход процессов в сети. Каждая из них, однако, выполняет эту роль лишь временно. Другой уровень представлен взаимодействием между приторможенными, не выделенными СУТ, *i*-моделями. Соотношение между этими уровнями, рассматриваемое со стороны их взаимодействия и функциональной роли в процессе переработки информации, может быть поставлено в соответствие соотношению между осознанным и неосознанным (подсознательным) компонентами мышления человека. В этом случае выделенная СУТ *i*-модель выступает в качестве аналога осознанной мысли; образ или понятие, соответствующее этой *i*-модели, характеризует содержание мысли или осознаваемый материал: процесс же последовательных переключений СУТ может быть соотнесен процессу формирования упорядоченной последовательности или «потока» осознаваемых мыслей.

Изменение активностей не выделенных СУТ *i*-моделей рассматривается как процесс «подсознательной» переработки информации. Существенно, что жесткая граница между «сознанием» и «подсознанием» (здесь и в дальнейшем для удобства изложения термины «сознание» и «подсознание» будем использовать вместо терминов «осознанный компонент мышления» и «неосознанный компонент мышления» соответственно) не фиксируется: «осознанным» может оказаться любой образ или понятие, а время его нахождения в «сознании» зависит от его собственной актуальности (возбужденности *i*-модели) в соответствующие моменты времени. В каждый момент времени «осознается» только незначительная часть имеющейся в М-сети информации, основная же ее масса перерабатывается в «подсознании».

Возбужденность находящихся в «подсознании» *i*-моделей постоянно изменяется в ходе функционирования М-сети. Можно выделить три группы факторов, определяющих динамику возбуждения каждой из не выделенных СУТ *i*-моделей. К первой из них относятся параметры собственных характеристик *i*-моделей. В каждый момент времени эти параметры определяют степень ее возбудимости, меру «восприимчивости» к тормозным воздействиям, способность поддерживать собственную активность при отсутствии входных воздействий. Вторая группа факторов определяет влияние на данную *i*-модель других, непосредственно связанных с ней, *i*-моделей сети. В эту группу входят возбужденности таких *i*-моделей, а также проходимости усиливающих и тормозных компонент подходящих к данной *i*-модели связей. Третью группу факторов составляют механизмы и характеристики, влияние которых изменяет режим работы М-сети в целом. Прежде всего в эту группу входит СУТ. Каждая из *i*-моделей сети «непо-

средственно» воспринимает тормозные или усиливающие воздействия от различных уровней этой специфичной системы. Кроме того, выделяемые ею в каждый момент времени *i*-модели по имеющимся связям передают полученное ими дополнительное возбуждение множеству *i*-моделей, находящихся в «подсознании».

Важным фактором, влияющим на распределение возбуждений, являются также общие оценки состояния, вырабатываемые в «чувственной» сфере М-сети (возбуждение интегральных центров «приятно» и «неприятно»). В зависимости от характера этих оценок изменяется режим работы СУТ и, соответственно, степень усиления и притормаживания всех *i*-моделей сети. Существенную роль играет также состояние гипотетического «тела» системы. Возбуждение специальных центров «голода», «усталости» и т. п. изменяет состояние *i*-моделей чувств, и эти изменения по множеству связей, отходящих от *i*-моделей чувственной сферы, передаются другим *i*-моделям сети.

В процессе функционирования М-сети каждый из упомянутых факторов изменяет значения остальных и сам изменяется под их воздействием. Пусть, например, на некоторые *i*-модели сети поступают усиливающие воздействия и активность этих *i*-моделей велика. Соответственно гипертрофируются их характеристики и повышается возбудимость. Проторяются имеющиеся между ними связи и устанавливаются новые, с другими *i*-моделями. Процесс возбуждения распространяется в сети. Это вызывает переключения СУТ, и дополнительная активность перераспределяется по проторенным связям. Новая картина возбуждений изменяет состояние чувственной сферы, и *i*-модели последней, в свою очередь, усиливаются и тормозят активность других. В то же время изменяется режим работы СУТ, увеличивается или уменьшается уровень реализуемого ею усиления и торможения. Возбудимость постоянно активных *i*-моделей растет, и в результате они усиленно реагируют даже на слабые входные воздействия. Образуется, так сказать, «очаг возбуждения», захватывающий внимание — усиление и самостоятельно поддерживающий свою активность. Однако исходящие от него воздействия постоянно возбуждают другие *i*-модели, активность которых постепенно нарастает и в какой-то момент становится достаточной для «привлечения» СУТ. Переключение СУТ вызывает торможение ранее активных *i*-моделей и усиление новых. Происходит перераспределение возбуждений. Становятся активными новые *i*-модели чувственной сферы. Заторможенные *i*-модели адаптируются, и возбудимость их уменьшается. В результате сформировавшийся, было, очаг возбуждения распадается и заменяется новым. Однако и он существует лишь некоторое ограниченное время и может

быть разрушен как поступлением новых возбуждений извне, так и изменением состояний «тела», характера оценок функционирования и т. п. Постоянное протекание такого рода процессов в функционирующей М-сети с содержательной стороны соответствует «переживанию» М-автоматом различных эмоций, желаний и стремлений, принятию решений, их выполнению, узнаванию внешних ситуаций и т. п.

Развитие описанного процесса сопровождается постоянными переключениями СУТ и, следовательно, осознанием тех или иных фрагментов перерабатываемой информации. Ясно, что появление в какой-либо момент определенной осознанной мысли является результатом взаимодействия множества сложных информационных процессов, протекающих в подсознании.

Отсюда не следует, однако, что М-сеть является аналогом некоторого фрейдовского «id», безраздельно управляющего процессами осознания. Дело в том, что на появление определенной осознанной мысли оказывает существенное влияние «предыстория» переключений СУТ. В самом деле, усиленная СУТ *i*-модель обеспечивает высокую активность других *i*-моделей, и прежде всего тех, которые связаны с ней хорошо проторенными связями. Их возбужденность повышается в наибольшей степени, и именно они обретают возможность завладеть вниманием при первом же его переключении. Процесс осознания подчиняется, таким образом, не только массовой «игре возбуждений» в сети, но и определенной логике, обусловленной структурой связей между *i*-моделями. Последняя же, как уже упоминалось, отражает совокупность родовидовых, ассоциативных и других отношений между соответствующими *i*-моделями понятий. Кроме того, выделяемая СУТ *i*-модель повышает свою возбудимость за счет гипертрофии, так что в течение некоторого времени после осознания данного понятия вероятность его повторного выделения СУТ сравнительно велика. Если такие повторные выделения происходят, что случается при отсутствии отвлекающих раздражителей или в процессе целенаправленного обучения, то такая *i*-модель может сама превратиться в постоянный очаг возбуждения. При этом соответствующее понятие, скажем, привитое социальной средой,— «долг», «стыд» и т. п.— может активно конкурировать за внимание с понятиями и образами, поддерживаемыми чувствами или состоянием «тела». Осознание той или иной мысли является, таким образом, результатом взаимодействия обоих уровней мышления — сознательного и подсознательного. В зависимости от «тренированности» *i*-моделей и связей, т. е. характера зафиксированной в сети информации, один или другой компонент мышления играет доминирующую роль.

**Ход мышления** *. Каждой $i$-модели может быть поставлено в соответствие слово (или группа слов) естественного языка, обозначающее в этом языке тот элемент психической реальности, который соотносится с данной $i$-моделью. Так, например, при построении М-сети в нее может быть введена $i$-модель, соответствующая определенному чувственному образу. Тот же образ обозначается некоторым словом в естественном языке. При построении и анализе М-сети мы будем пользоваться таким словом для обозначения содержательного значения данной $i$-модели (в нашем примере содержательное значение $i$-модели задано ее соотнесением с «определенным чувственным образом»). Можно говорить, следовательно, об $i$-модели чувственного *образа*, например предмета «стол», $i$-модели *понятия* «стол», $i$-модели *слова* «стол» и т. п., имея в виду, что это разные $i$-модели, их содержательное значение различно и обозначается разными словами.

Последовательность моделей, выделенных СУТ в процессе функционирования М-сети, может быть, таким образом, поставлена в соответствие одновременно двум последовательностям (объектов) различной природы. Одной из них является последовательность мыслей, осознаваемых субъектом в ходе его деятельности. Эту последовательность мы и назвали потоком мыслей субъекта. Соответственно последовательность выделенных СУТ $i$-моделей может быть названа «потоком мыслей» автомата. Другой последовательностью, соотносимой с «потоком мыслей», является последовательность слов естественного языка, определяемая содержательным значением выделяемых СУТ $i$-моделей. Такая последовательность слов является содержательной интерпретацией, описанием «потока мыслей» автомата.

Последовательность выделенных СУТ $i$-моделей в обобщенном виде характеризует ход и направление развития процессов переработки информации в М-сети, или, иначе говоря, «ход мышления» М-автомата. Действительно, феномен выделения СУТ тех или иных $i$-моделей тесно связан с общим ходом процесса передачи возбуждений в М-сети, является его непосредственным и наиболее доступным для наблюдения следствием. «Поток мыслей» М-автомата можно, следо-

---

* Сделаем оговорку относительно дальнейшего изложения. После того как те или иные из обсуждаемых интерпретаций зафиксированы, оказывается удобным обозначить заимствованными из психологии терминами и понятиями соответствующие процессы в М-сети. Их использование носит, естественно, условный характер, что и подчеркивается в тексте соответствующей расстановкой кавычек. В дальнейшем, однако, чтобы не затруднять чтения, мы будем опускать кавычки в тех случаях, когда «автоматный» характер использования психологической терминологии будет достаточно ясен из контекста.

вательно, рассматривать в качестве приближенного содержательного описания его «хода мышления». Имея в виду указанное соответствие, в дальнейшем будем использовать термин «ход мышления» автомата наряду с термином «поток мыслей».

Анализ хода мышления автомата является одним из основных инструментов оценки качества его функционирования. При этом могут быть сконструированы как строгие, формализованные, так и неформальные процедуры оценки. В первом случае критерии качества функционирования можно формулировать в терминах, характеризующих степень соответствия хода мышления автомата его внешнему окружению и внутреннему состоянию. Во втором случае используются интуитивные критерии, и оценка формируется на основе содержательных интерпретаций хода мышления. В дальнейшем оба эти случая будут продемонстрированы на конкретных примерах.

Итак, говоря о ходе мышления автомата и анализируя его, мы будем, по существу, иметь в виду не всю совокупность протекающих в сети процессов передачи возбуждений, а лишь описание «потока мыслей» автомата. Рассмотрим некоторые свойства таких описаний.

В соответствии с семантикой выделяемых СУТ $i$-моделей содержание осознанных мыслей системы составляют различные компоненты информационного процесса, реализуемого сетью. Это могут быть: зрительные, слуховые, тактильные и многомодальные образы — при восприятии информации из среды и при узнавании объектов внешнего мира; образы, принадлежащие высшим этажам,— при узнавании не отдельных фрагментов, а целостных ситуаций и протяженных во времени сцен: ощущения, чувства, эмоции и желания; понятия, соответствующие различным образам и состояниям чувственной сферы; абстрактные понятия; слова, соответствующие понятиям и образам любого уровня сложности и абстракции; образы, представления и понятия о действиях — от сложных трудовых процессов до простых движений; образы из прошлого — при вспоминании; образы-модели будущего — при предвидении, планировании, воображении. Содержание осознаваемых мыслей, таким образом, полностью определяется разнообразием смысловых характеристик информационных моделей, включенных в систему. Варьируя состав и структуру М-сети, мы, следовательно, имеем возможность с той или иной степенью полноты воспроизводить в моделях феномен содержательного разнообразия потока мыслей.

Пусть какая-либо $i$-модель выделена СУТ и получила дополнительное возбуждение. Следствием этого является увеличение воздействий от выделенной $i$-модели прежде всего на

те $i$-модели сети, которые непосредственно связаны с нею. Естественно, что мера этого воздействия тем больше, чем выше проходимость соответствующих связей. В результате активность упомянутых $i$-моделей увеличивается и возрастает вероятность выделения какой-либо одной из них при следующем переключении СУТ. Именно эти $i$-модели становятся, таким образом, непосредственными «кандидатами» на осознание. Возбужденность каждой из моделей-кандидатов определяется также множеством других воздействий на нее «из подсознания», так что в целом процесс переключения СУТ детерминируется одновременным влиянием обоих уровней переработки информации. В функционирующей М-сети возникает, таким образом, своеобразный феномен «преемственности» осознания: каждая осознанная $i$-модель как бы стремится переключить СУТ на одну из непосредственно и наиболее сильно связанных с ней $i$-моделей-кандидатов. Поскольку структура связей между $i$-моделями не является случайной (как уже упоминалось ранее, связи между $i$-моделями отражают определенные взаимосвязи между образами, понятиями и т. п.), описанный феномен внешне выступает как явление связности «потока мыслей» автомата.

В некоторых случаях, однако, связность «потока мыслей» может быть нарушена. Так, например, при поступлении в сеть новой информации СУТ может переключиться на одну из входных $i$-моделей, возможно, и не связанную непосредственно с $i$-моделью, которая была выделена в предыдущий момент. Это тем более вероятно, если новая информация является важной, т. е. соответствующие входные $i$-модели обладают особенно высокой возбужденностью. Еще пример. Пусть СУТ выделила некоторую $i$-модель, и непосредственно связанные с ней модели-кандидаты получают по связям дополнительные входные воздействия. В течение некоторого времени с момента переключения СУТ фиксирует выделенную $i$-модель, возбужденность последней постепенно уменьшается, а остальные $i$-модели растормаживаются. Получая дополнительные входные воздействия, модели-кандидаты возбуждаются, и их возбуждение передается по связям к другим $i$-моделям. Может случиться так, что связи от моделей-кандидатов конвергируют на какой-либо $i$-модели, непосредственно не связанной с моделью, выделенной СУТ. Получая дополнительное возбуждение, такая $i$-модель по мере растормаживания возбуждается все сильнее, так что в некоторый момент ее возбужденность может оказаться большей, чем возбужденности и первично выделенной $i$-модели, и моделей-кандидатов. В результате СУТ переключится именно на такую $i$-модель, и связность переключений будет нарушена. Аналогичный эффект может возникнуть и в том случае, если на некоторой «отдаленной» $i$-модели будут конвергировать

связи не от всех, а лишь от некоторых моделей-кандидатов или если возбужденность такой *i*-модели будет активно поддерживаться от существующих в подсознании «скрытых очагов» возбуждения.

*Ассоциации.* Можно выделить два основных типа нарушений «связности мышления». Первый из них составляет такие переключения СУТ с одной *i*-модели на другую, непосредственно с ней не связанную, причиной которых является перераспределение активности в М-сети, обусловленное либо процессами в подсознании (сильное возбуждение какой-либо *i*-модели вследствие одновременного воздействия на нее множества относительно слабо возбужденных *i*-моделей, влияние скрытого очага возбуждения и т. п.), либо восприятием новой информации. Нарушения связности второго типа возникают в тех случаях, когда причиной переключения СУТ на «отдаленную» *i*-модель служит перераспределение по имеющимся связям дополнительного возбуждения от *i*-модели, выделенной СУТ в предыдущий момент. Нарушения второго типа назовем ассоциативными переходами. Необходимо отметить, что представление об ассоциативном переходе охватывает не только упомянутый случай нарушения «связности мышления», но и такое переключение СУТ, при котором связность не нарушается.

Связи между *i*-моделями в М-сети в общем случае не являются ассоциативными, т. е. не всегда отражают наши представления об ассоциативных связях между реальными психическими образованиями, которым соответствуют *i*-модели. С информационной точки зрения в общем случае они обозначают лишь функциональную зависимость связываемых объектов. Так, например, усиливающая связь, направленная от *i*-модели «образ стола» к *i*-модели понятия «мебель», отражает взаимную зависимость этих понятий в ходе обработки информации и указывает на то, что актуальность (прагматическая ценность) понятия «мебель» возрастает, если по каким-либо причинам актуализируется «образ стола». Или иначе: если в ходе некоторой деятельности нам приходится иметь дело с объектом «стол», то следует восстановить, подготовить к использованию имеющуюся у нас информацию и относительно «мебели» — класса объектов, к которому «стол» принадлежит.

В то же время совокупность связей обеспечивает феномен ассоциирования в функционирующей М-сети. Ассоциативная связь является, таким образом, более общим понятием, чем связь в М-сети, и может задаваться как одной, так и некоторым набором связей между *i*-моделями. Актуализация же ассоциативной связи, т. е. собственно ассоциация, выступает в виде переключения СУТ с одной *i*-модели на другую. Пример ассоциации в М-сети рассмотрен нами несколько ранее, при

обсуждении одного из механизмов нарушения связности «потока мыслей» (конвергенция связей от *i*-моделей-кандидатов на удаленную *i*-модель).

Наличие в М-сети определенной конфигурации связей между *i*-моделями может обеспечить регулярную повторяемость тех или иных ассоциативных переходов. При желании М-сеть можно описать, построив некоторую другую, «ассоциативную», сеть, узлы которой будут соответствовать выделяемым СУТ *i*-моделям (в М-сети СУТ не обязательно выделяет все *i*-модели в процессе функционирования), а связи — ассоциативным переходам, каждый из которых может быть охарактеризован некоторой мерой вероятности возникновения соответствующей ассоциации.

Законы функционирования М-сети, вообще говоря, обеспечивают установление новых связей между *i*-моделями, последовательно выделяемыми СУТ (поскольку существует момент, когда возбужденность обеих велика). Эти связи, являющиеся уже собственно ассоциативными, действительно облегчают повторные переключения СУТ на те же *i*-модели. Если такие переключения будут происходить часто, то новые связи закрепятся. Если же повторных переключений не произойдет, ассоциативные связи не будут зафиксированы в сети, что, однако, не исключает повторного возникновения тех же ассоциаций на основе «первичной» структуры. Следует также отметить, что не всякое ассоциативное переключение СУТ вызывает установление новой связи, поскольку в реальных М-автоматах, как правило, вводится запрет на связывание *i*-моделей, принадлежащих некоторым специально выделяемым сферам. Это ограничение вводится, прежде всего, из соображений удобства работы с моделями. Таким образом, в каждый данный момент в М-сети могут существовать связи как ассоциативной природы, так и «не ассоциативные».

Легко видеть, что возникающие в М-сети ассоциации могут быть естественным образом классифицированы по различным основаниям, сходным с теми, по которым классификация ассоциаций производится и в психологии. Так, по временным условиям образования они могут быть разделены на ассоциации по смежности в пространстве (СУТ одновременно выделяет две или более *i*-моделей, и между ними устанавливаются связи) и на ассоциации по смежности во времени (СУТ выделяет связываемые *i*-модели последовательно). Основанием для другой классификации может служить семантическая характеристика выделяемых СУТ *i*-моделей, что соответствует классификации, основанной на различии содержания психических образований, между которыми устанавливается связь.

В процессе функционирования М-сети переключения СУТ реализуются как по второму, так и по первому из описанных

типов. Существенно, однако, что с функциональной точки зрения различия между переключениями первого и второго типов не существует. А это означает, что в результате «перескока» между первоначально «далекими» друг от друга *i*-моделями, последовательно выделенными СУТ, может установиться новая связь. После ее установления создаются условия для повторных реализаций данной ассоциации, выступающей уже как процесс, протекающий по второму типу переключений. Если в сети существует, например, постоянный очаг возбуждения, «притягивающий» к себе СУТ, то в результате происходящих время от времени переключений СУТ на другие *i*-модели, не связанные с данным очагом и возбуждающиеся независимо от него, все новые и новые *i*-модели связываются с этой постоянно доминирующей системой, включаются в нее и поддерживают ее возбуждение. Такого рода процессы могут лежать в основе «навязчивых состояний», когда внешне нейтральные раздражители возвращают мысль к некоторому узкому кругу идей или представлений.

Резюмируя сказанное, отметим, что законы функционирования М-сети обеспечивают определенную связность хода мышления. Последняя выступает при этом не как некоторое постоянное свойство этого процесса, а лишь как его тенденция, которой противостоит противоположная по характеру тенденция к разрушению, забыванию связей. В ходе своего функционирования М-сеть постоянно изменяется, отображая в своей структуре, моделируя в ней не только характер внешних воздействий, но и собственные внутренние реакции на эти воздействия. Таким образом, М-сеть как бы формирует собственную «логику мышления», фиксируемую в связях и отражающую основные свойства как среды, так и самой М-сети.

*Режимы СУТ.* Посмотрим теперь, как влияют на ход мышления автомата изменения режима работы СУТ. Напомним (подробнее об этом см. работы [4, 5]), что значения различных параметров СУТ могут изменяться в ходе функционирования М-автомата. Так, величина добавочного возбуждения выделенной *i*-модели находится в определенной зависимости от величины возбужденностей *i*-моделей НПр («неприятно») и Пр («приятно»). Степень притормаживания не выделенных СУТ *i*-моделей всегда пропорциональна дополнительному возбуждению выделенных. Чем больше дополнительное возбуждение *i*-модели в момент ее выделения, тем быстрее оно затухает в последующие моменты.

Предположим, что автомат находится в среде, содержащей опасные для него объекты. В процессе восприятия внешней информации признаки опасности выделяются, возбуждаются соответствующие *i*-модели сети, их возбуждение передается в понятийную и чувственную сферы — начинается

процесс переработки информации и поиска нужных решений. В ходе этого процесса активно возбуждаются *i*-модели отрицательных эмоций — автомат «переживает» страх, недовольство и т. п. Соответственно увеличивается возбужденность *i*-модели НПр, и режим работы СУТ изменяется. Это изменение выражается в увеличении дополнительного возбуждения выделяемых СУТ *i*-моделей и последующем резком снижении их возбуждения. Одновременно происходит пропорционально сильное торможение и затем быстрое растормаживание остальной сети. В результате очередное переключение СУТ осуществляется через более короткий промежуток времени, чем это происходило бы в «нейтральном» режиме. Поэтому характерной особенностью мышления автомата, находящегося в опасной ситуации, является высокий темп смены осознаваемых мыслей.

В первые моменты после осознания опасности переключения СУТ будут иметь в основном характер «перескоков». Значительное усиление выделяемых *i*-моделей и быстрый темп переключений СУТ создают условия для формирования очага возбуждения — устанавливаются и проторяются связи между сильно возбужденными *i*-моделями. Естественно, что формирование такого очага существенно зависит от состояния чувственной сферы автомата, т. е. от его «субъективной» оценки опасности и соотношения возбужденностей чувственной и логической сфер М-сети. При преимущественном возбуждении чувственной сферы переключения СУТ будут происходить в основном между *i*-моделями, непосредственно отражающими опасное внешнее воздействие, и моделями эмоций.

Итак, для мышления М-автомата, находящегося в опасной ситуации, характерны высокий темп переключений внимания, сокращение разнообразия осознаваемых мыслей, возникновение замкнутых кругов при осознании. В целом это близко к картине, наблюдаемой в бытовых ситуациях: в периоды сильных эмоций или напряжения круг мыслей в общем невелик, внимание все время возвращается к вопросам, послужившим причиной этого возбуждения.

Если автомат находится в нейтральной ситуации и возбуждения *i*-моделей отрицательных и положительных эмоций сбалансированы (это может соответствовать, например, спокойному интересу), то замкнутые круги могут не возникнуть и темп переключения СУТ будет сравнительно невелик. Последнее обстоятельство связано с тем, что уменьшается добавочная возбужденность *i*-моделей от СУТ и, соответственно, степень заторможенности подсознания. Колебания возбужденности выделяемых СУТ *i*-моделей медленны, внимание дольше задерживается на каждой мысли. Ход мышления становится более разнообразным, поскольку отсутствуют

сильные внешние раздражители, формирующие или поддерживающие очаги возбуждения. Поскольку при этом средняя возбужденность выделяемых СУТ $i$-моделей оказывается небольшой, увеличивается вероятность «пробиться в сознание» для $i$-моделей со сравнительно небольшой активностью. Ход мышления становится более «разветвленным», увеличивается влияние на него неосознаваемых процессов.

Можно представить себе существование и таких состояний (сон, глубокий покой), когда активность СУТ минимальна и ее тормозные воздействия на $i$-модели сети не оказывают существенного влияния на развитие подсознательных процессов. В этом случае роль последних в процессе мышления оказывается доминирующей, и вниманием могут овладевать обычно неосознаваемые образования, активность которых в других состояниях оказывается недостаточной для привлечения внимания.

Подробное рассмотрение процессов, протекающих на уровне подсознания, может оказаться чрезвычайно полезным для уяснения механизмов формирования и выявления основных особенностей «потока мыслей» автомата. Поэтому дополнительно остановимся на некоторых особенностях подсознательных процессов.

**Скрытые очаги возбуждения.** Основным понятием при описании процессов в подсознании является уже использовавшееся выше понятие скрытого очага возбуждения. Таким очагом может быть как отдельная $i$-модель, так и совокупность взаимосвязанных $i$-моделей. Будем вначале представлять его себе в виде одной $i$-модели.

Скрытый очаг возбуждения характеризуется тем, что представляющая его $i$-модель постоянно возбуждена до определенной степени, однако ее возбужденность, как правило, недостаточна для привлечения внимания.

Функциональная роль скрытого очага возбуждения заключается в том, что, не будучи осознаваем, он активно влияет на процесс перераспределения возбуждений в сети. По имеющимся связям постоянно возбужденная $i$-модель оказывает воздействие на другие $i$-модели сети, увеличивая вероятность их выделения СУТ. Происходит как бы субтимация активности такой $i$-модели в дополнительную активность других. М-сеть может одновременно содержать несколько скрытых очагов возбуждения, тогда их совокупное влияние на процесс осознания явится существенным фактором формирования «потока мыслей» — наряду с другими факторами, не связанными непосредственно с подсознательными процессами.

*Механизм образования очагов возбуждения.* В самых общих чертах механизм образования скрытых очагов возбуждения состоит в следующем. На каждую $i$-модель функциони-

рующей М-сети постоянно воздействует целый ряд факторов, часть которых обусловливает возрастание, а часть — убывание ее активности. Под влиянием активирующих факторов (усиливающие воздействия по связям, гипертрофия возбудимости, выделение СУТ) формируется тенденция к увеличению возбужденности *i*-модели; влияние же других факторов (тормозные воздействия по связям, адаптация возбудимости, собственное затухание активности, торможение от СУТ) формирует тенденцию к подавлению активности *i*-модели, т. е. к уменьшению ее возбужденности. В соответствии с выраженностью той или иной тенденции в данный момент изменяется и текущая активность *i*-модели. В тех случаях, когда одна из тенденций выражена сильнее, чем другая, возбужденность *i*-модели либо весьма велика — и тогда *i*-модель часто выделяется СУТ, активно влияет на другие *i*-модели и т. п., либо она весьма мала — и тогда роль *i*-модели в процессе переработки информации становится второстепенной или даже практически незначимой. В общем случае относительное влияние обеих тенденций для каждой *i*-модели постоянно изменяется во времени, что сопровождается соответствующими изменениями возбужденностей *i*-моделей: каждая из них то увеличивает свою активность, «захватывая» СУТ и оказывая решающее влияние на ход мышления автомата, то «погружается в подсознание», уступая доминирующую роль другим, более актуальным в сложившейся ситуации элементам сети.

Опыт работы с М-автоматами показал, что в функционирующей М-сети для некоторых *i*-моделей могут складываться такие условия возбуждения и торможения, при которых в течение длительного времени обе противоположные тенденции оказываются выраженными для той или иной *i*-модели или их совокупности примерно в равной степени. В случае такого динамического равновесия возбужденность соответствующих *i*-моделей существенно не изменяется, так что длительное время они могут оказывать значительное влияние на развитие процессов в сети. Такие модели или их совокупности мы и называем очагами возбуждения.

В зависимости от условий формирования активность того или иного очага возбуждения может быть относительно велика — и тогда СУТ часто выделяет составляющие его *i*-модели (*i*-модель). В этих случаях очаг возбуждения выступает в качестве осознаваемой образно-понятийной структуры, в течение определенного времени удерживающей внимание и, соответственно, определяющей круг «осознаваемых мыслей» автомата. В других случаях активность очага возбуждения может быть невелика. Его существование, следовательно, не будет оказывать заметного влияния на процессы в сети и при анализе последних может не учитываться. В ряде же случаев активность очага возбуждения может быть значительной,

однако не превышающей активности других *i*-моделей. Последние, соответственно, будут постоянно «захватывать» СУТ, так что такой очаг возбуждения выступит в качестве некоторой неосознаваемой образно-понятийной структуры, играющей тем не менее значительную роль в формировании хода мышления автомата. Именно такого рода структуры мы и будем называть скрытыми очагами возбуждения.

Рассмотрим некоторые наиболее характерные случаи образования скрытых очагов возбуждения в функционирующей М-сети. Так, *i*-модель может превратиться в скрытый очаг возбуждения, если она является представителем некоторого постоянно напряженного стремления или сложного рефлекса, заданного автомату при его построении. Пусть мы хотим, например, чтобы конструируемый М-автомат был способен организовать поведение, направленное на самосохранение. С этой целью мы должны задать ему ряд сложных рефлексов и инстинктов и среди них — защитный. В реализации этого инстинкта у высших животных принимает участие чувство (или эмоция) страха. Соответственно, введем в структуру нашего М-автомата *i*-модель такого чувства (наряду с набором других *i*-моделей и связей, которые не являются сейчас предметом нашего рассмотрения).

Если построенный М-автомат окажется впоследствии в среде, содержащей потенциально опасные для него объекты, то *i*-модель чувства страха будет постоянно возбуждена. В ситуациях, содержащих непосредственную опасность, это чувство может быть осознано. В других же ситуациях оно может оставаться в подсознании, выступая в качестве скрытого очага возбуждения; *i*-модель чувства страха может быть связана хорошо проторенными связями с другими *i*-моделями, например, желания спрятаться, понятия опасности и т. п. Активность этих *i*-моделей будет постоянно поддерживаться возбуждением чувства страха, так что они могут сами превратиться в скрытые очаги возбуждения — каждая в своей сфере. Наличие таких очагов наложит определенный отпечаток на ход мышления и на реакции автомата, поскольку наибольшую вероятность для осознания будут иметь понятия и образы, тесно связанные с отрицательными эмоциями и «системой защиты» автомата. Можно сказать, что такой автомат будет постоянно «напряжен».

Другой механизм формирования скрытых очагов возбуждения связан с гипертрофией характеристик возбуждения часто осознаваемых *i*-моделей. Так, если в некоторой ситуации одна или несколько *i*-моделей (понятий, образов, чувств и т. п.) играют ведущую роль в процессе принятия решений, сильно возбуждены и часто осознаются, то их возбудимость со временем увеличивается и они начинают отвечать «взрывами» активности даже на незначительные входные воздей-

ствия. В других ситуациях, где роль этих *i*-моделей уже невелика, они сохраняют свою высокую возбудимость и, следовательно, повышенную активность, превращаясь на некоторое, быть может, значительное, время в скрытые очаги возбуждения. В рассмотренном выше примере М-автомат с гипертрофированной *i*-моделью чувства страха может сохранить свою «напряженность» и после перехода в благоприятную для него среду, не содержащую опасных объектов.

Скрытые очаги возбуждения могут формироваться также вследствие связывания отдельной *i*-модели с большим количеством других, часто возбуждаемых моделей. Таковыми зачастую оказываются *i*-модели чувств и эмоций. В самом деле, возбуждение чувственной сферы является непременным компонентом развития информационных процессов, направленных на принятие решений в самых разнообразных ситуациях. Соответственно, *i*-модели чувств и эмоций в процессе функционирования *M*-сети возбуждаются весьма часто, так что в любой момент времени те или иные из них достаточно активны. В некоторых ситуациях процесс возбуждения охватывает практически всю чувственную сферу; при этом многие из ее *i*-моделей оказываются одновременно возбужденными в значительной степени. Если в период такого «эмоционального подъема» окажется сильно возбужденной (быть может, случайно) *i*-модель из какой-либо другой сферы, то между ней и *i*-моделями чувственной сферы установится большое количество связей. Поскольку и в дальнейшем, в других ситуациях, *i*-модели чувственной сферы возбуждаются, часть активности такой *i*-модели постоянно поддерживается, и она, в свою очередь, оказывает постоянное влияние и на *i*-модели чувств, и на другие *i*-модели, непосредственно связанные с нею.

*Процессы вытеснения.* Остановимся на рассмотрении еще одного механизма возникновения скрытых очагов возбуждения, который можно условно назвать механизмом «вытеснения». Пусть в М-сети существует некоторая *i*-модель А, связанная с другими таким образом, что активность ее часто бывает велика и она часто выделяется СУТ. Это означает, что соответствующие такой *i*-модели понятие, чувство или образ играют значительную роль в реализуемых автоматом процессах переработки информации. Ситуация такого рода может явиться следствием процессов обучения в сети или особенностей ее предорганизации, а также совместного влияния этих факторов, проявляющегося при определенных внешних входных воздействиях на автомат.

Часто выделяемая СУТ, т. е. доминирующая, *i*-модель *A* передает дополнительное возбуждение другим, непосредственно связанным с ней *i*-моделям. Те, в свою очередь, пере-

распределяют его между собой и передают дальше, в более отдаленные от $A$ области сети. В результате складывается определенная картина возбуждений в сети, некоторое характерное ее состояние, постоянно поддерживаемое возбуждением доминирующей $i$-модели. Различным состояниям М-сети соответствуют определенные действия, т. е. выходные сигналы, формируемые автоматом. Постоянное сильное возбуждение $i$-модели $A$ создает, таким образом, предрасположенность, тенденцию к выполнению автоматом некоторых действий, $i$-модели которых могут не быть непосредственно связаны с $A$, но получают часть ее дополнительного возбуждения, перераспределенного и трансформированного в сети.

Если действия, «провоцируемые» возбуждением $i$-модели $A$, приводят к положительному эффекту и подкрепляются возбуждением положительных эмоций, то связи $A$ с другими $i$-моделями сети усиливаются и ее доминирующее положение закрепляется. Если же эти действия оказываются неудачными и влекут за собой «наказание» со стороны среды или некоторой обучающей системы, то вследствие преимущественного возбуждения интегрального центра НПр в сети происходит переобучение связей. При этом усиливаются тормозные компоненты связей между всеми сильно возбужденными $i$-моделями и, прежде всего, с $i$-моделью $A$, а также устанавливаются новые связи с преимущественным тормозным компонентом. Происходит как бы «блокирование» $i$-моделей, активность которых приводит к «наказуемым» действиям. При этом активнее всего «блокируется» $i$-модель $A$, поскольку ее высокая возбужденность служит теперь своеобразным «обвинительным актом» против нее. В то же время возбуждение $i$-модели $A$ по-прежнему поддерживается теми же факторами, которые ранее обеспечили ее доминирование. Однако наличие тормозных связей приводит к снижению уровня ее возбужденности. СУТ перестает выделять $i$-модель $A$, и она «погружается в подсознание», переходя в разряд скрытых очагов возбуждения. Другие $i$-модели сети, выполнявшие ранее функции перераспределения дополнительного возбуждения от $A$ и заторможенные в меньшей степени, быстро освобождаются от «блокирования» вследствие естественного затухания связей. Что же касается $A$, то долговременная память сильно проторенных тормозных связей может надолго удержать ее в состоянии низкой активности. Развивающиеся при этом процессы адаптации дополнительно понизят ее возбужденность, доминирующая роль $A$ в процессе переработки информации будет утеряна, однако, находясь в подсознании, эта $i$-модель будет оказывать скрытое влияние на ход мышления столь долго, сколь долго будут существовать факторы, поддерживающие ее активность. Со временем блокирующие ее связи могут ослабеть, затухнуть, и тогда весь процесс

повторится снова. После каждого из повторений период блокирования будет все удлиняться по мере роста постоянных компонентов тормозных связей. В конце концов, после определенного периода обучения активность $i$-модели $A$ стабилизируется на некотором постоянном уровне, отражающем интенсивность поддерживающих ее факторов, но не столь высоком, чтобы вызывать дальнейшее «блокирование».

В роли факторов, поддерживающих активность вытесняемой $i$-модели, могут выступать различные процессы и механизмы, в том числе и те, которые были описаны несколько выше при анализе причин возникновения скрытых очагов возбуждения. К ним относятся гипертрофия характеристик возбуждения $i$-модели, связь ее с большим количеством часто возбуждающихся $i$-моделей и т. п. В тех случаях, когда влияние этих факторов не является постоянным, для вытеснения $i$-модели оказывается достаточным одного-двух «наказаний». Действительно, после «наказания» условия функционирования ранее сильно возбужденной $i$-модели существенным образом изменяются: увеличиваются тормозные воздействия на нее по связям, уменьшается вследствие адаптации ее возбудимость, она постоянно притормаживается СУТ, из-за низкой активности перестают проторяться ее связи с другими $i$-моделями и т. п. Поэтому возможность снова «захватить» внимание и усилиться для однажды «заблокированной» $i$-модели весьма невелика. Дело обстоит иначе только в том случае, если активность вытесненной $i$-модели поддерживается постоянно и в достаточной степени. Именно такая $i$-модель может стать скрытым очагом возбуждения. Чаще всего это происходит, если $i$-модель является представителем инстинкта или сложного рефлекса, заданного автомату при его предорганизации, либо какой-то другой программы, сформированной в процессе самообучения автомата. Если одна из программ такого рода становится неадекватной в сложившихся внешних условиях, то ее активность, несмотря на «подавление» и «блокирование» основных $i$-моделей, может сохраняться в подсознании длительное время.

Интересно отметить следующее обстоятельство. Любая программа реализуется в М-сети функционированием некоторой совокупности сильно связанных между собой $i$-моделей. Кроме того, $i$-модели могут быть связаны также с другими $i$-моделями сети, которые условно можно называть вторичными элементами данной программы. Через вторичные $i$-модели осуществляется косвенное влияние программы на ход мышления автомата. Программа, например, может быть представлена лишь небольшим количеством $i$-моделей понятий и простых чувств. Вторичными же могут быть $i$-модели эмоций, желаний, действий и т. п. Работа программы может осуществляться на низком уровне активности (т. е. при малой воз-

бужденности непосредственно реализующих ее *i*-моделей), что обычно и происходит, поскольку в сети одновременно функционирует большое количество программ и СУТ усиливает лишь немногие из них. В то же время активность некоторых из вторичных *i*-моделей может оказаться весьма высокой, так как на них могут конвергировать возбуждения не только от данной программы, но и от чувств, рецепторов и т. п. В результате складывается следующая ситуация. Если работа какой-либо определенной программы приводит к нежелательным в данной ситуации результатам, то «блокируются» в первую очередь не ее собственные, а вторичные *i*-модели. Сама же программа, вследствие небольшой активности своих элементов, оказывается при этом незатронутой. Она продолжает функционировать и поддерживает возбужденность других, «неблокированных», вторичных *i*-моделей. Наиболее активные из этих последних оказываются со временем вытесненными в подсознание, и влияние программы на поведение осуществляется через возбуждение остальных, может быть, весьма косвенно связанных с ее основным содержанием. Так, например, «подавление» защитной программы (осуществляемое, скажем, путем формирования в автомате тормозных систем, эквивалентных понятиям «бояться стыдно», «бежать стыдно» и т. п.) может привести к «блокированию» *i*-моделей действий «бежать», «скрыться» и т. п. В этом случае функционирование такой программы может быть выражено повышенной активностью *i*-моделей других действий, так что автомат будет проявлять повышенную тенденцию, например, к нападению. При этом функционирующая по-прежнему (на уровне собственных *i*-моделей) программа самосохранения будет препятствовать нападению на действительно опасные объекты, и «агрессивность» автомата окажется направленной на объекты, опасные в небольшой степени или даже нейтральные. Описанный пример является, конечно, условным. Не следует полагать, что подсознательные процессы подобного типа играют доминирующую роль в формировании поведения М-автомата. Напротив, они протекают на низком уровне активности и не могут быть актуализированы без участия сознания, ведущая роль которого в процессе «мышления» автомата уже обсуждалась ранее.

До сих пор мы условно полагали, что скрытый очаг возбуждения реализуется в М-сети одной *i*-моделью. Использование этого предположения позволило упростить рассуждения и рассмотрение примеров. Однако в реальных М-сетях отдельная *i*-модель выступает в качестве скрытого очага возбуждения весьма редко.

*Ансамбли i-моделей.* Как уже упоминалось, порядок переключений СУТ в М-сети детерминируется конфигурацией и проторенностью связей между *i*-моделями. Обычно развет-

вленность связей в М-сети весьма велика. Проведенные нами эксперименты показали, что в нормально функционирующей М-сети количество связей с ненулевой проходимостью составляет в среднем 10—15 на одну *i*-модель. Каждая *i*-модель, таким образом, является центром некоторой звездообразной структуры, по лучам которой она передает дополнительную активность в тех случаях, когда ее выделяет СУТ. Если СУТ по каким-либо причинам выделяет одну и ту же *i*-модель несколько раз, то повышается возбудимость не только выделяемой *i*-модели, но и ее непосредственных «соседей», их активность увеличивается, связи между ними проторяются и они начинают взаимно поддерживать возбуждение друг друга. В результате повышается вероятность переключения СУТ на одну из них, и, когда это происходит, описанные процессы повторяются. При этом дополнительное возбуждение перераспределяется в основном между теми *i*-моделями, связи между которыми уже дополнительно проторены в результате предыдущих выборов. Это приводит к тому, что и при следующем переключении СУТ его «захватывает» одна из *i*-моделей той же группы. В результате формируется более или менее ограниченная совокупность сильно связанных между собой *i*-моделей, которая может «удерживать» СУТ внутри себя длительное время. Но даже и после переключения СУТ на другие, не связанные с нею, *i*-модели указанная группа продолжает функционировать в подсознании, поддерживая собственную активность за счет разнообразия внутренних связей. По аналогии с нейронными ансамблями можно назвать такую группу ансамблем *i*-моделей.

Характерным свойством ансамбля *i*-моделей является то, что он возбуждается весь при возбуждении нескольких его элементов. Соответственно, ансамбль «пытается захватить» СУТ всякий раз, когда последняя выделяет входящую в него *i*-модель. Между отдельными ансамблями может существовать взаимосвязь, реализуемая связями между *i*-моделями, которые входят в разные ансамбли. Ансамбли могут и «пересекаться», т. е. некоторые *i*-модели одновременно входят в несколько разных ансамблей. За счет взаимных связей и пересечений ансамбли также могут образовывать связные группы — ансамбли «второго слоя». «Захватив» СУТ, каждый из отдельных ансамблей стремится или удержать ее, или «передать» другому, связаному с ним,— в пределах системы «второго слоя», в которую он входит. Существование в М-сети системы ансамблей внешне выражается в формировании более или менее жестких типичных последовательностей или программ переключений СУТ, т. е. в возникновении некоторых стереотипов мышления и действий автомата. В этих случаях может возникнуть впечатление, что, кроме алгоритмов функционирования автомата (описанного ранее алгоритма *A*),

в М-сети реализованы еще некоторые «мета-алгоритмы» принятия решений, достижений целей и т. п.

Однажды сформировавшийся ансамбль *i*-моделей стремится поддержать свое существование, «захватывая» СУТ и перераспределяя внутри себя поступающую к его *i*-моделям активность. Однако такой ансамбль может распасться из-за естественного затухания связей, торможения его отдельных *i*-моделей (по связям) и торможения от СУТ, если последняя достаточно долго не выделяет *i*-модели данного ансамбля. Таким образом, «ансамблевая» структура М-сети является динамичной и легко изменяемой.

Некоторые ансамбли могут, тем не менее, существовать в М-сети длительное время, даже не привлекая СУТ, если активность отдельных составляющих их *i*-моделей постоянно поддерживается. Именно такие ансамбли и выступают в качестве скрытых очагов возбуждения. Механизм их формирования, по существу, не отличается от описанных ранее. Во многом сходна и их функциональная роль в информационных процессах, реализуемых М-сетью.

Специфика же ансамблей, выступающих в качестве скрытых очагов возбуждения, состоит в следующем. Зачастую ансамбль *i*-моделей представляет собой самостоятельную функциональную единицу сети — блок, функционирование которого реализует определенную, иногда весьма сложную совокупность операций по переработке информации. Работа таких блоков может быть описана с помощью специальных алгоритмов. Ансамбли этого типа часто и формируются при обучении автомата решению тех или иных задач. Не всегда, однако, ансамбли фиксируют известные, заученные алгоритмы. В процессе взаимодействия *i*-моделей ансамбля могут выполняться и такие системы операций, которые не соответствуют ни одному из когда-либо «преподанных» автомату алгоритмов, а отражают его «индивидуальные», сложившиеся в процессе деятельности приемы и методы решения задач. Будучи погруженными в подсознание, т. е. обладая пониженной активностью, такие ансамбли не только оказывают воздействие на другие ансамбли и *i*-модели, что влияет на общий ход мышления автомата, но и продолжают функционировать в качестве решающих систем. Окончательные результаты их деятельности могут впоследствии осознаваться. Поскольку промежуточные этапы решения находились в подсознании, акт осознания конечных результатов выступает здесь как аналог неожиданной догадки, интуитивного решения и т. п. феноменов, часто имеющих место при решении задач человеком. Следует отметить, что указанные феномены могут быть воспроизведены в М-сети не только за счет функционирования в подсознании отдельных ансамблей, но и систем из них, т. е. ансамблей «второго слоя».

Ансамбли *i*-моделей могут формироваться вокруг отдельной *i*-модели, если ее возбужденность в течение некоторого времени велика. Ансамбль может возникнуть также в результате многократного выделения СУТ некоторой фиксированной последовательности *i*-моделей. На этом, кстати, основывается один из эффективных приемов целенаправленного обучения М-автомата, предполагающий многократное повторение учителем постоянной последовательности входных сигналов, сопровождающейся сигналами «поощрения» и «наказания» ответных реакций автомата. Наконец ансамбль может возникнуть как внутреннее отражение, модель регулярных свойств внешней среды, воспринимаемой автоматом, или как модель определенной совокупности действий, приводящих к успеху в той или иной внешней ситуации. При содержательном анализе функциональной роли и процессов формирования ансамблей последние выступают в качестве аналога ассоциативных систем, формирующихся в процессе взаимодействия человека с внешней средой.

Нами рассмотрены отдельные ситуации, которые могут возникнуть при взаимодействии *i*-моделей, находящихся на низком уровне активности. При этом мы стремились показать принципиальную возможность соотнесения процессов в М-сетях некоторым психическим процессам. В дальнейшем мы продолжим работу в несколько ином направлении, устанавливая соответствия между функциями отдельных механизмов М-сети и некоторыми психическими функциями.

**Внимание.** Для того чтобы продемонстрировать возможности конструктивного использования при построении М-автоматов сведений о качествах и характеристиках функции внимания, которые имеются в литературе по психологии, попытаемся развить установленную ранее аналогию между вниманием и СУТ.

Начнем с рассмотрения одной из наиболее важных характеристик внимания — его объема, который определяется числом объектов, охваченных вниманием в ограниченный отрезок времени. Напомним, что М-сеть работает в дискретном времени и в каждый момент СУТ выделяет одну или несколько наиболее возбужденных *i*-моделей. Количество одновременно выделяемых СУТ *i*-моделей сопоставляем с объемом внимания, а сведения о величине объема внимания у человека, в зависимости от различных факторов, используем для определения соответствующих параметров СУТ.

Возбужденность одновременно выделяемых СУТ *i*-моделей не обязательно должна быть строго одинаковой по величине. Иначе говоря, реализуемая СУТ точность сравнения возбужденностей *i*-моделей может быть невелика (в проведенных нами экспериментах она изменялась от 1 до 20%). Фактически это выражается в том, что СУТ, кроме макси-

мально возбужденной, выделяет и те $i$-модели, возбужденность которых в определенных и заранее заданных пределах близка к максимальной. Очевидно, что чем выше требования к точности сравнения возбужденностей, тем меньше вероятность одновременного выделения СУТ нескольких $i$-моделей. В зависимости от условий конкретных задач, решаемых с помощью М-автомата, «меру близости» возбуждений выделяемых СУТ $i$-моделей можно изменять путем соответствующего изменения определенных параметров СУТ.

Напомним, что общая величина дополнительного возбуждения не зависит от количества выделяемых $i$-моделей. Распределение дополнительного возбуждения от СУТ может быть равномерным или зависеть от собственной возбужденности каждой $i$-модели. Вид распределения может также меняться в зависимости от ряда внешних и внутренних факторов, например от наличия нерешенной задачи или текущего значения интегративной оценки состояния М-сети (разности возбуждений $i$-моделей Пр и НПр). Суммарная величина дополнительного возбуждения от СУТ также может быть различной в разные моменты времени и зависеть, например, от той же интегративной оценки состояния М-сети. Естественно, что чем больше эта суммарная величина, тем сильнее влияние выделенных СУТ $i$-моделей на остальную сеть. При этом независимо от вида распределения дополнительного возбуждения будет существовать связь между количеством выделяемых СУТ $i$-моделей и «долей» дополнительного возбуждения, приходящейся на каждую из них. Среднюю величину дополнительного возбуждения выделяемых СУТ $i$-моделей можно рассматривать как аналог глубины (интенсивности) внимания. Нетрудно заметить, что чем меньше объем внимания, тем больше его глубина при постоянном дополнительном суммарном возбуждении. Уменьшение последнего связано не только с уменьшением дополнительного возбуждения каждой из выделяемых СУТ $i$-моделей, но и с пропорциональным уменьшением степени притормаживания остальных $i$-моделей сети. Соответственно, чем меньше «глубина внимания», тем чаще будут происходить переключения СУТ, что вполне согласуется с психологическими данными о влиянии глубины внимания человека на процесс его мышления.

*Иерархическая организация СУТ.* При описании этой системы отмечалось, что СУТ может содержать некоторое множество подсистем, принадлежащих различным уровням ее организации. Рассмотрим более подробно работу такой многоуровневой СУТ. Пусть все $i$-модели сети по какому-либо признаку условно объединены в несколько непересекающихся групп. Назовем их группами первого (низшего) уровня. Эти группы могут, в свою очередь, быть объединены в более крупные группы второго уровня, последние — в группы

третьего уровня и т. д. Группа самого верхнего уровня включает в себя все группы предыдущего и, следовательно, все *i*-модели сети. Общее количество уровней такой «пирамиды» в каждом конкретном случае может быть определено в зависимости от сложности М-сети и сложности задач, для решения которых строится автомат.

Каждой группе *i*-моделей соответствует одна из подсистем СУТ. Иначе говоря, в М-сети одновременно функционирует столько подсистем СУТ, сколько групп различных уровней в ней выделено. Подсистемы СУТ низшего уровня (уровни подсистем будем выделять в соответствии с уровнями групп, на которых они работают) производят сравнение возбуждений, усиление выделенных и торможение остальных *i*-моделей только в пределах своих групп. Подсистемы СУТ второго уровня, каждая в пределах своей группы, производят сравнение уже средних возбуждений групп *i*-моделей нижнего уровня. Дополнительно усиливается при этом не отдельная *i*-модель, а все *i*-модели выделяемой в данный момент группы; *i*-модели остальных групп того же уровня пропорционально притормаживаются. Аналогично работают СУТ третьего уровня и т. д., причем каждый раз сравниваются средние возбуждения групп *i*-моделей предыдущего уровня. Влияние всех подсистем СУТ сказывается на активности *i*-моделей, составляющих исходное множество, так что каждая конкретная *i*-модель сети может получать дополнительное возбуждение от подсистем одних уровней и притормаживаться подсистемами других уровней. Одноуровневая СУТ, принцип работы и некоторые интерпретации которой обсуждались выше, является частным случаем многоуровней системы усиления — торможения. Представления и понятия, введенные выше для этого частного случая, могут быть теперь несколько дополнены.

Будем для определенности рассматривать М-сеть, на которой задана двухуровневая СУТ. Посмотрим, как изменяется в этом случае содержание введенных ранее понятий «осознанная мысль», «поток мыслей», «ход мышления» и др. Пусть *i*-модели сети разделены на группы. Одну из них могут составлять *i*-модели образов, другую — *i*-модели понятий, третью — слов, четвертую — действий и т. д. В каждой из этих групп работают подсистемы СУТ первого уровня. Количество их, естественно, совпадает с количеством групп первого уровня. Подсистема СУТ второго уровня (СУТ-2) в данном случае одна.

Пусть в некоторый момент времени наибольшим средним возбуждением обладает одна из групп, например группа *i*-моделей образов. (Подсчет и сравнение средних возбуждений групп выполняют специальные блоки алгоритма, реализующего в данном автомате функции СУТ. Средние возбуждения

групп этот алгоритм может рассчитывать как среднее арифметическое возбуждений входящих в группы *i*-моделей или каким-либо иным способом.) В рассматриваемый момент подсистема СУТ-2 выделит группу *i*-моделей образов (наиболее возбужденную) и дополнительно увеличит возбужденность всех входящих в нее *i*-моделей, пропорционально притормозив остальные *i*-модели сети. В тот же момент та из подсистем СУТ первого уровня, которая функционирует на группе *i*-моделей образов, также выделит некоторую наиболее возбужденную *i*-модель. Эта *i*-модель образа и будет считаться осознанной в данный момент времени.

Предположим, что в следующий момент подсистема СУТ-2 не изменила своего состояния и по-прежнему выделяет группу образов, а подсистема СУТ первого уровня в этой группе переключилась на другую *i*-модель. Это означает, что одна осознанная мысль сменилась другой, причем содержанием их обеих являются образы (естественно, разные). Процесс может развиваться и иначе. В следующий момент времени подсистема СУТ первого уровня в группе образов может не изменить своего состояния, а подсистема второго уровня — переключиться, скажем, на группу *i*-моделей понятий. В этой группе своя «региональная» подсистема СУТ может выделить в этот же момент некоторую *i*-модель. Последняя выступит как новая осознанная мысль. Теперь изменяется не только конкретное содержание осознанной мысли, но и тип этого содержания — осознается уже не образ, а понятие.

Как и раньше, последовательность осознаваемых мыслей, сменяющих друг друга в процессе функционирования М-сети, будем называть «потоком мыслей». Последний, как уже упоминалось, в некотором грубом приближении можно рассматривать как обобщенную характеристику всей совокупности реализуемых М-сетью процессов переработки информации. Эту совокупность для краткости назовем ходом мышления автомата. При использовании многоуровневой СУТ ход мышления может быть описан более подробно.

В самом деле, фиксируя последовательности переключений всех подсистем СУТ, мы, по сути дела, фиксируем некоторое множество разноуровневых описаний хода мышления. Это становится возможным благодаря тому обстоятельству, что при разделении М-сети на различные группы используются некоторые содержательные критерии, и поэтому различным последовательностям групп, выделяемых подсистемами СУТ разных уровней, могут быть поставлены в соответствие определенные последовательности фиксированных заранее слов естественного языка. Эти последовательности слов, характеризующих содержательные и интуитивно определенные системы представлений, и используются в дальней-

шем как основа для содержательного описания и анализа хода мышления.

Описания наиболее высокой степени общности формируются при рассмотрении переключений подсистемы СУТ высшего уровня. Так, если в нашем примере подсистема СУТ-2 последовательно выделяет группы *i*-моделей образов, понятий, слов и эмоций, то мы можем описать реализуемый М-сетью ход мышления как такой процесс, который на первых этапах своего развития формировался преимущественно в образной сфере мышления, используя, в основном, информацию, полученную путем чувственного восприятия внешней среды. Затем в качестве ведущего компонента этого процесса выступили понятийные и словесные структуры. Соответственно, на этом этапе содержанием мыслительных операций являлись относительно более строгие операции логического характера, конструируемые на основе упорядоченной системы знаний, зафиксированной в структуре сети. Дальнейшее развитие процесса привело к выдвижению на главный план процедур эмоциональной оценки и т. д. В приведенном изложении мы стремились подчеркнуть относительный характер доминирования тех или иных элементов на различных этапах развития целостного процесса переработки информации сетью. В то время как ведущую роль в этом процессе играют, скажем, понятийные структуры, продолжают функционировать и все остальные *i*-модели сети, представляющие образы, чувства, слова и т. п. Протекающие параллельно и непрерывно взаимодействия этих элементов и формируют, собственно говоря, тот целостный процесс, приближенное описание которого можно построить, интерпретируя изменения состояний высшего уровня СУТ.

Описание хода мышления следует продолжить и детализировать на основе анализа работы подсистем СУТ нижнего уровня. При этом можно будет уточнить, какие именно образы, понятия и т. п. играли основную роль на тех или иных этапах изучаемого процесса, рассмотреть динамику их взаимных влияний, более подробно описать внутреннее содержание реализуемых сетью операций. Однако и здесь описания не будут исчерпывающими, поскольку основанием для них является рассмотрение не всей совокупности протекающих в сети процессов, а лишь хода мышления, реализуемого подсистемами СУТ в каждой из групп *i*-моделей низшего уровня.

Таким образом, ясно, что полное описание хода мышления может быть построено лишь на основе анализа и одновременного учета изменения активностей всех *i*-моделей сети. Только на этом уровне описаниям может быть придана та строгость и однозначность, которая отсутствует в содержательных интерпретациях хода мышления. Построение достаточно полных описаний является, к сожалению, весьма труд-

ной задачей, сложность которой неизмеримо возрастает с увеличением объема М-сети. С другой стороны, аппарат М-сетей и развивается именно для моделирования информационных систем большой сложности и объема. До настоящего времени нам не удалось найти и эффективно использовать для формального описания процессов в М-сетях какие-либо математические методы и языки. Именно поэтому построение содержательных описаний хода мышления является необходимым этапом в практической работе по исследованию и настройке М-автоматов. Многоуровневая СУТ позволяет в зависимости от характера конкретных задач исследования использовать описания различных — соответственно решаемым задачам — степеней общности.

Вернемся к рассмотрению нашего условного примера. Пусть подсистема СУТ-2 по-прежнему выделяет группу $i$-моделей образов. Активность этих $i$-моделей соответственно велика; группа образов в целом доминирует над другими группами. Будем условно говорить, что группа $i$-моделей, которая доминирует над другими группами, принадлежащими тому же уровню, выделяется вниманием соответствующего уровня, или, иначе, осознается на этом уровне. Использование многоуровневой СУТ позволяет, таким образом, ввести представление об уровнях осознания.

*Уровни осознания.* На каждом из уровней процессы осознания реализуются в ходе параллельного функционирования сразу многих подсистем СУТ (это, конечно, не относится к высшему уровню). Переключения каждой из этих подсистем внутри своей группы подчиняются некоторой «внутренней логике» этой группы, определяемой структурой взаимосвязей и активностью ее элементов ($i$-моделей или групп более низкого уровня). Анализируя процессы, развивающиеся в какой-либо группе данного уровня, можно выделять процессы ассоциирования отдельных ее элементов, процессы формирования из них ансамблей, процессы вытеснения и т. п. Все они протекают при непосредственном участии «обслуживающей» эту группу подсистемы СУТ.

На различных уровнях одновременно функционирует много подсистем, которые относительно самостоятельно реализуют определенную часть общего многоуровневого процесса осознания. Можно сказать, что работа каждой из подсистем СУТ формирует один из планов осознания, а процесс осознания в целом — не только многоуровневый, но и многоплановый.

Самостоятельность, автономность различных уровней и планов процесса осознания является лишь относительной, о ней можно говорить условно и только в тех случаях, когда тот или иной уровень, тот или иной план специально выделяются для решения частных задач анализа протекающих

в сети процессов, например для построения содержательных описаний хода мышления. В действительности же осознание развивается как единый, целостный процесс, различные уровни и планы которого взаимосвязаны.

В самом деле, все подсистемы СУТ функционируют на одном и том же множестве *i*-моделей, составляющих исходную М-сеть. О связях между различными группами мы говорили ранее лишь условно: они реализуются множеством реально существующих в М-сети связей между *i*-моделями, входящими в разные группы. Сколько бы уровней ни содержала СУТ, каждая *i*-модель сети непременно входит в одну из групп каждого уровня. Поэтому любое переключение подсистемы, принадлежащей любому уровню, вызывает перераспределение возбуждений практически всех *i*-моделей сети. Те из них, которые принадлежат выделяемой данной подсистемой группе, получают дополнительное возбуждение, остальные притормаживаются. Дополнительное возбуждение передается по связям к другим *i*-моделям, картина возбуждений в сети меняется, и это вызывает очередные переключения не только подсистемы, непосредственно вызвавшей эти изменения, но и всех остальных. Каждая из них, в свою очередь, влияет на активность *i*-моделей и через них — на переключения других подсистем. Взаимодействия такого рода и объединяют множество отдельных подсистем СУТ в единую функциональную систему.

*Глубина подсознания.* Использование многоуровневой СУТ позволяет также ввести представление об уровнях, или глубине, подсознания. Для того чтобы пояснить это представление, обратимся опять к нашему условному примеру, где подсистема СУТ-2 все еще выделяет группу *i*-моделей образов. «Региональная» подсистема этой группы выделяет одну *i*-модель образа, например, «книга». Другие *i*-модели образов находятся, следовательно, в подсознании. Пусть среди них имеется *i*-модель образа «стол». Выделив группу образов, подсистема второго уровня притормозила *i*-модели остальных групп, в том числе и *i*-модели понятий. Тем не менее, одна *i*-модель понятия, пусть это будет *i*-модель понятия «плод», оказалась по каким-то причинам возбужденной в большей степени, чем другие *i*-модели группы понятий. Соответственно, она выделена подсистемой СУТ первого уровня, функционирующей на *i*-моделях этой группы, или, другими словами, она осознана на низшем уровне. Следовательно, эта *i*-модель получила некоторое добавочное возбуждение, а остальные, неосознанные на этом уровне, *i*-модели понятий дополнительно приторможены. Среди этих последних имеется, скажем, *i*-модель понятия «дерево».

В описанной ситуации осознанную мысль представляет *i*-модель образа «книга», остальные же *i*-модели «погружены»

в подсознание. Однако состояния этих неосознанных образов, понятий и т. п. существенно отличаются друг от друга. Действительно, из общих правил функционирования СУТ следует, что наибольшую активность из находящихся в подсознании *i*-моделей может иметь *i*-модель образа «стол». Именно эта *i*-модель, принадлежащая к группе, осознанной на высшем уровне, и включенная в ту же ассоциативную систему, что и осознанная *i*-модель, имеет наибольшую возможность «захватить» местную СУТ при следующем ее переключении и, следовательно, стать осознанной мыслью автомата. Наименьшая вероятность занять это место существует для *i*-модели понятия «дерево», активность которой тормозится двумя подсистемами СУТ — высшей и местной. Некоторое промежуточное положение занимает *i*-модель понятия «плод», заторможенная высшей, но выделенная местной подсистемой СУТ. Упорядочив эти *i*-модели по степени убывания их активности и, следовательно, вероятности осознания, мы получим ряд: «стол» — «плод» — «дерево». Будем говорить, что *i*-модель, занимающая в этом ряду последнее место, наиболее глубоко «погружена» в подсознание, находится на его низшем уровне. Чем ближе *i*-модель к началу ряда, тем более высоким уровням подсознания она принадлежит.

Максимальную глубину подсознания, таким образом, характеризует разность возбужденностей наиболее активной и наименее активной *i*-моделей сети. В процессе функционирования М-автомата значение этого параметра может изменяться. Однако наши эксперименты показали, что для каждого конкретного М-автомата такие изменения ограничены определенными пределами, так что средняя глубина подсознания является одной из общих характеристик М-автоматов и ее можно использовать в качестве одного из критериев для классификации последних. Градации активности между минимально и максимально возможными уровнями характеризуют уровни подсознания. Для каждого конкретного М-автомата можно при желании построить некоторую «шкалу» таких уровней; ее использование будет полезным при анализе и описании подсознательных процессов. Такая «шкала», очевидно, не должна быть жесткой и может изменяться с изменением режима работы СУТ (при фиксированных характеристиках элементов М-сети).

В ходе функционирования М-сети отдельные *i*-модели и их группы могут переходить с одного уровня подсознания на другой в зависимости от характера решаемых автоматом задач и воздействий на него со стороны внешней среды. В каждый момент времени структура подсознания, т. е. конкретный вид распределения *i*-моделей по его уровням, определяется взаимодействием двух факторов. Один из них представлен непосредственными воздействиями *i*-моделей

друг на друга по имеющимся между ними связям. В качестве другого фактора выступают воздействия на М-сеть со стороны подсистем СУТ. Структура подсознания в определенной мере отражает структуру осознаваемых процессов. В самом деле, если подсистема СУТ высшего уровня выделяет некоторую группу $i$-моделей, то все они получают дополнительную активность, что и может обеспечить их переход на более высокий уровень подсознания. Если в этой группе имеются подгруппы и подсистема более низкого уровня выделяет одну из них, то соответствующее подмножество $i$-моделей сможет перейти на еще более высокий уровень. Но и эта подгруппа может содержать в себе группы следующего, более низкого, уровня, и в результате работы соответствующей подсистемы СУТ еще какие-то $i$-модели смогут «подняться» на новый уровень, приблизившись к границе осознания. На вершине такой пирамиды, пределы которой расплывчаты и постоянно изменяются, всегда находится несколько (или одна) наиболее возбужденных $i$-моделей. Каждая из них выделена одной из «местных» подсистем СУТ и принадлежит к осознанной на следующем уровне группе, которая, в свою очередь, входит в группу, осознанную на более высоком уровне, и т. д. Именно эти несколько или одна $i$-моделей и являются осознанными мыслями всей системы.

Дальнейший анализ процессов, протекающих в подсознании автомата с многоуровневой СУТ, мы продолжать не будем. Так как все необходимые представления уже введены в предыдущем изложении, то этот анализ может быть продолжен читателем самостоятельно. Отметим только, что на основе подробного рассмотрения процессов, протекающих в подсознании, может быть выявлен и уточнен ряд интересных особенностей динамики взаимодействия различных уровней подсознания, формирования ансамблей $i$-моделей и их групп (ассоциативных систем), образования скрытых очагов возбуждения и т. п. Возникающие в ходе такого анализа аналогии с процессами и феноменами психической природы могут оказаться весьма интересными и полезными для разработчиков искусственного разума.

Отметим еще, что качественный характер развитых выше представлений отнюдь не является обязательным как способ описания при анализе процессов в М-сетях. Напротив, при работе с конкретными действующими М-автоматами все использованные нами содержательные понятия неизбежно оказываются выраженными в количественной (числовой) форме. В дальнейшем будем описывать и приводить конкретные результаты экспериментов с действующими моделями, в том числе и с моделью, содержащей многоуровневую СУТ.

Напомним, что основная цель наших разработок состоит в изучении путей построения технических систем автомати-

зации сложных видов деятельности. Психологические интерпретации таких систем не входят в число основных задач данной работы, они играют в ней лишь вспомогательную, эвристическую роль. Поэтому при обсуждении конкретных экспериментальных результатов мы не будем прибегать к интерпретациям и обоснованиям «от психологии», хотя достаточный для этого материал будет приведен.

*О реализации СУТ в М-автоматах.* Вопрос об определении оптимального количества уровней СУТ при построении М-автоматов должен решаться отдельно в каждом конкретном случае. Введение в СУТ каждого нового уровня существенно изменяет характер протекающих в М-сети процессов и, следовательно, определяет особенности поведения автомата. Поэтому «уровневость» СУТ должна быть обусловлена особенностями тех задач, для решения которых предназначен данный М-автомат. Чем более «жесткий» характер протекания реализуемых М-сетью программ переработки информации требуется для решения задач, чем реже должен переходить автомат от одного вида деятельности к другому, чем более «волевым» должно быть его поведение, тем больше уровней СУТ целесообразно реализовать в М-автомате. Современная техника моделирования (например, ЦВМ) не накладывает здесь существенных ограничений, поскольку сложность алгоритмов СУТ сравнительно невелика. Следовательно, ведущая роль в решении этого вопроса обусловлена изучением соответствий между параметрами СУТ и теми особенностями поведения автомата, которыми они управляют. Описание соответствий такого рода и должно послужить основой для синтеза СУТ, оптимальной по отношению к решаемым задачам. Наш практический опыт в этой области невелик, и здесь имеются богатые возможности для проведения дальнейших исследований.

Существует также другой путь определения целесообразного числа уровней СУТ в М-автоматах. Он основан на использовании аналогии, установленной между функциями, реализуемыми СУТ в работе М-автомата, и ролью внимания в мышлении человека. Поскольку М-автомат предназначен для воспроизведения именно человеческой деятельности, представляется оправданной попытка сделать хотя бы приближенные заключения относительно целесообразной «уровневости» СУТ на основе изучения внешних проявлений внимания человека. Разработка и анализ психологических аналогий (некоторые из них приведены в данном разделе) позволили установить, что для удовлетворительного объяснения ряда важных феноменов психики достаточно использовать представление о СУТ как о системе, содержащей сравнительно небольшое число уровней — от двух до четырех

(см. об этом также в работе [5]). На эти цифры мы и ориентировались при разработке действующих моделей.

Поскольку общепринятого представления об уровнях внимания в психологии не существует, введение многоуровневой СУТ можно считать искусственным, скорее техническим, чем содержательным, приемом моделирования. Тем не менее именно такой искусственный прием позволяет более полно использовать ряд сведений о внимании, имеющихся в литературе по психологии. Дело в том, что при описании различных свойств внимания часто одни и те же термины используются для обозначения процессов, разный уровень общности которых очевиден. Говорят, например, о концентрации внимания на объекте (предмете) и концентрации внимания на определенном виде деятельности, включающем в себя манипулирование множеством отдельных объектов. В М-сети эти, вообще говоря, различные процессы можно реализовать действием различных уровней СУТ.

Для иллюстрации упомянутой возможности приведем следующий пример. Известно, что сосредоточение внимания на восприятии зрительной информации существенно (в десятки раз) уменьшает чувствительность к восприятию звуков. В М-сети аналогичный феномен может быть воспроизведен при помощи двухуровневой СУТ следующим образом. Пусть СУТ верхнего уровня выделяет сферу зрительных восприятий и притормаживает остальные, в том числе и слуховые. Внутри сферы зрительных восприятий соответствующая подсистема СУТ нижнего уровня выделяет наиболее возбужденную *i*-модель, которая в данный момент времени соответствует наиболее значимому «рассматриваемому» объекту. Образ этого объекта осознается. Затем подсистема СУТ нижнего уровня переключается на *i*-модели других объектов: но до тех пор, пока не переключится на другую сферу подсистема СУТ верхнего уровня, осознаваться будут только зрительные образы объектов. Может показаться, что мы описали крайний случай, соответствующий не уменьшению чувствительности к восприятию звуков, а полному выключению этого канала поступления информации. Однако полного торможения сфер, ответственных за восприятие внешней информации, обычно не происходит. Напомним еще раз, что восприятие внешней информации по тем каналам, которые не включены в данный момент в сферу внимания, а также переработка информации во всей сети происходят постоянно, хотя и на низком «энергетическом уровне». Так, слуховая информация воспринимается и перерабатывается и в том случае, когда внимание привлечено исключительно, например, к зрительному восприятию. При этом, естественно, *i*-модели сферы слуховых восприятий приторможены, что соответствует феномену уменьшения чувствительности к вос-

приятию звуков при концентрации внимания на зрительном восприятии. Если, однако, в этот период по слуховому каналу поступит достаточно важная информация, то СУТ верхнего уровня может переключиться на соответствующую сферу, и тогда неосознаваемые ранее слуховые образы будут осознаны.

Процесс, более близкий к реальному протеканию восприятия внешней информации, может быть описан и реализован при помощи трехуровневой СУТ. Пусть на нижнем уровне выделены отдельно сферы восприятия зрительных и слуховых образов. На втором уровне пусть выделена «сфера восприятий», включающая в себя обе предыдущие сферы. Если СУТ верхнего (здесь — третьего) уровня выделяет «сферу восприятий», а внутри этой сферы возбуждения сфер зрительных и слуховых образов примерно равны, то осознаваться будут одновременно и зрительные, и слуховые образы. В зависимости от уровня дополнительного возбуждения обеих нижних сфер можно говорить о равномерности или неравномерности распределения внимания на восприятие соответствующих образов.

Приведенное описание многоуровневой СУТ может послужить основой для интерпретации и других свойств внимания, таких, как переключаемость, устойчивость, интенсивность и т. п.

В заключение отметим, что при построении М-автоматов возможны различные способы реализации СУТ. Не следует считать, что СУТ — это обязательно алгоритм, стоящий в определенном смысле «над сетью» и выполняющий роль некоего «демона», в функции которого входит управление процессами в М-сети. Действительно, при построении М-автоматов в виде программ для ЦВМ удобно описывать функции СУТ алгоритмом. Однако даже в этом случае существует тесная связь между сетью и СУТ. Так, например, величина дополнительного усиления от СУТ находится в прямой зависимости от состояния чувственной сферы М-сети. Распределение дополнительного усиления, параметры затухания выделяемых СУТ $i$-моделей и другие параметры СУТ также могут определяться возбуждением отдельных $i$-моделей или их групп в сети. Таким образом, М-сеть и СУТ следует рассматривать как взаимосвязанные части одной системы.

Функции СУТ могут быть реализованы также и непосредственно сетью. При этом необходимы определенные изменения и усложнения характеристик $i$-моделей. При реализации М-автомата на ЦВМ такие усложнения оказываются нерациональными в связи с ограничением объема оперативной памяти и быстродействия ЦВМ. В тех же случаях, когда М-автомат строится в виде физического устройства, объединение сети и СУТ в единую систему становится не только желательным, но и необходимым в связи с парал-

лельностью и непрерывностью протекания всех процессов. В настоящее время общие принципы такой реализации функций СУТ в «физической» М-сети уже разработаны и проверены экспериментально [8].

Таким образом, мы описали в общих чертах основные принципы взаимного соотнесения различных свойств внимания и СУТ. Перейдем теперь к рассмотрению других вопросов, связанных с возможностью психологических интерпретаций процессов в М-сети. Кратко остановимся на способах реализации в М-сети различных видов памяти, а также влияния структуры и параметров элементов М-сети на поведение автомата.

**Память.** При описании языка моделирования упоминалось о некоторых возможных способах представления отдельных видов памяти в М-сети. В связи с особо важным местом понятия памяти в работах как психологического, так и кибернетического направлений остановимся на этом вопросе более подробно.

Прежде всего перечислим способы фиксации, хранения и воспроизведения информации, которые реализуются в М-сети.

Однажды возбужденная $i$-модель, даже при отсутствии активных входных воздействий, сохраняет некоторое время состояние возбужденности, которое можно рассматривать как память о прошлом воздействии. При наличии активных входных воздействий на уже возбужденную $i$-модель происходит нелинейное суммирование собственной возбужденности $i$-модели, отражающей предыдущие активные воздействия, и вновь поступивших воздействий. Таким образом, в каждый момент времени в возбужденности $i$-модели отражена память о целом ряде последовательных входных воздействий. Длительность этой памяти зависит от вида характеристики затухания $i$-модели.

В процессе функционирования $i$-модели происходит гипертрофия и адаптация ее характеристик. Если $i$-модель длительное время имеет достаточно высокую возбужденность, т. е. важность зафиксированной в ней информации постоянно велика, то характеристики $i$-модели изменяются таким образом, что ее возбуждение со стороны остальных $i$-моделей сети облегчается — осуществляется гипертрофия характеристик. В противном случае происходит обратный процесс — адаптация, в результате которой возбудимость $i$-модели уменьшается. Таким образом, изменения возбудимости $i$-модели, определяемые гипертрофией или адаптацией ее характеристик, реализуют память об «истории» активности данной $i$-модели. Память такого типа является, естественно, более длительной по сравнению с памятью возбуждений.

Между двумя возбужденными *i*-моделями устанавливается связь. Впоследствии ее проходимость увеличивается или уменьшается в зависимости от изменения возбужденности обеих *i*-моделей. Состояние связи как бы отражает «историю» (память) их совместных возбуждений, усредненную во времени. Если связь установлена с достаточно высокой проходимостью или достигла определенного уровня проходимости в процессе последовательных проторений, то значительно увеличивается и постоянный компонент проходимости, что, в свою очередь, увеличивает вероятность длительного сохранения этой связи.

При длительном возбуждении группы *i*-моделей происходит их объединение в некоторую устойчивую структуру — ансамбль, элементы которого сильно взаимосвязаны друг с другом. Наличие связей с высокой проходимостью между *i*-моделями ансамбля обеспечивает память об определенном состоянии М-сети даже после затухания возбуждения всех входящих в ансамбль *i*-моделей. «Вспоминание» этого состояния происходит уже при возбуждении части элементов ансамбля.

В М-сети существует еще один способ длительного запоминания состояний: формирование *i*-модели — «представителя» ансамбля. Такая *i*-модель имеет прямые и обратные связи со всеми *i*-моделями ансамбля. Возбуждение «представителя» ведет к возбуждению всего ансамбля, т. е. к восстановлению, «вспоминанию» состояния сети даже в том случае, когда сам ансамбль уже частично распался из-за затухания связей.

Между *i*-моделями различных ансамблей могут устанавливаться связи, сила (проходимость) которых зависит от частоты совместных возбуждений входящих в ансамбль *i*-моделей, состояния интегральных центров оценки Пр и НПр и некоторых других факторов. В результате сильно связанные *i*-модели имеют бóльшую вероятность последовательного выделения системой усиления — торможения по сравнению с остальными *i*-моделями сети. Аналогично, при выделении СУТ *i*-модели, принадлежащей одному из двух сильно связанных ансамблей, велика вероятность того, что через несколько моментов времени произойдет переключение СУТ на одну из *i*-моделей второго ансамбля. Такие часто повторяющиеся последовательные выделения СУТ определенных *i*-моделей или элементов определенных групп *i*-моделей можно сопоставить, как это уже упоминалось ранее, с ассоциативным переключением внимания у человека. Подобные ассоциации могут возникать между *i*-моделями одного или различных уровней, одной или различных сфер М-сети. При изменении конфигурации связей в ходе функционирования

сети могут изменяться и установившиеся системы ассоциаций. Учитывая то обстоятельство, что конфигурация связей в сети существенно зависит от воспринимаемой извне информации, т. е. от характера среды, в которой функционирует автомат, можно говорить, что система ассоциаций в М-сети автомата в определенной мере отражает состояние среды и «отношение» автомата к воспринимаемой извне информации. Развитая система ассоциаций позволяет автомату учитывать прошлый опыт и может рассматриваться как элемент предвидения.

Изменение активности интегральных центров оценки Пр и НПр оказывает влияние практически на все процессы в М-сети. В зависимости от разности возбужденностей *i*-моделей этих центров изменяется скорость проторения связей и влияние СУТ на процессы в сети. Сами *i*-модели Пр и НПр могут и не иметь существенно длительной памяти, однако косвенно память о состоянии этих *i*-моделей может существовать в сети значительное время. Так, например, если в какой-то момент времени возбужденность *i*-модели НПр намного превышает возбужденность *i*-модели Пр, то проходимости связей в сети существенно изменяются. Таким образом, путем изменения связей в М-сети осуществляется «память» об оценках ее деятельности.

Из изложенного видно, что память в М-сети реализуется всеми протекающими в ней процессами, а различные виды памяти представляют собой различные свойства и особенности этих процессов. Так, например, изменения возбужденности *i*-модели можно интерпретировать как кратковременную, а изменения проходимостей связей — как долговременную память. При этом по длительности запоминания фиксируемой связями информации можно различать два вида долговременной памяти, реализуемых временным и постоянным компонентами связи.

Рассмотрение содержательной стороны процессов в М-сети позволяет различать такие виды памяти, как двигательная, эмоциональная, образная и словесно-логическая. Они реализуются связями между *i*-моделями соответствующих сфер М-сети и, частично, связями между *i*-моделями, принадлежащими различным сферам. Так, связи внутри двигательной сферы фиксируют последовательности заученных автоматом действий. Чем больше проходимость таких связей, тем точнее выполняется вся последовательность. В то же время, чем быстрее проторяются связи внутри двигательной сферы, тем быстрее автомат запоминает необходимые действия. Таким образом, изменением параметров, определяющих величину проторения связей в двигательной сфере, можно изменять «силу» двигательной памяти автомата. Аналогичные рассуждения могут быть проведены и относительно словесно-ло-

гической памяти. Что же касается эмоциальной и образной памяти, то здесь большую роль играют характеристики возбуждения *i*-моделей этих сфер, а также связи от других сфер М-сети. Так, например, гипертрофированность характеристик *i*-моделей эмоциональной сферы и установленные с последними связи с высокой проходимостью могут обусловить преимущественную выраженность эмоциональной памяти. Аналогично, сильные связи к *i*-моделям образной сферы обеспечат повышенную образную память.

Запоминание информации в М-сети может происходить как при участии СУТ, так и без нее. Установление и проторение связей зависит в основном от возбужденности соединяемых ею *i*-моделей. Однако, если одна из них выделена СУТ, то направленная к ней связь будет усилена в большей степени, чем это произошло бы в «обычных» условиях, поскольку *i*-модель получает дополнительное возбуждение от СУТ. Переключения СУТ могут быть обусловлены определенной задачей, например задачей запоминания какого-либо материала. В этом случае можно говорить, что установление связей с высокой проходимостью между последовательно выделяемыми СУТ *i*-моделями соответствует произвольному запоминанию. В остальных случаях изменения конфигурации сети и значений параметров *i*-моделей и связей можно сопоставлять с непроизвольным запоминанием входной информации и результатов ее переработки. Более детальное обсуждение вопросов психологических интерпретаций процессов запоминания в М-сети может быть проведено при использовании М-автоматов в качестве моделей психики. Однако, поскольку нашей задачей является построение систем ИР, ограничимся уже приведенными интерпретациями и перейдем к последнему вопросу этого раздела — влиянию структуры и параметров М-сети на поведение автомата.

**Типы М-автоматов.** Конструируя М-автомат, мы задаем его структуру и функциональные характеристики элементов, исходя из имеющихся представлений о моделируемом виде деятельности. Естественно, что выбранная структура не должна и не является единственной, способной обеспечить «эффективное поведение» автомата в среде. Возможен целый класс автоматов с различными структурами и характеристиками ее элементов, который будет удовлетворять общим критериям «разумности» поведения в данной среде. В то же время каждый автомат этого класса будет организовывать свое поведение несколько отлично от других, так что в общем случае «стили» поведения автомата будут различны. Рассмотрим кратко пути преднамеренного задания автомату нужного «стиля» поведения.

Как уже говорилось, сеть М-автомата в соответствии с семантикой *i*-моделей может быть разделена на сферы. Связь

между $i$-моделями внутри сфер и между сферами, а также распределение возбуждений в сети определяют как внешнюю реакцию автомата на восприятие конкретной ситуации — действия, так и внутренние реакции автомата — «ход мышления», предшествующий выполнению этого действия. Характеристики $i$-моделей и параметры связей М-сети задают как бы «жизненный опыт» автомата. Естественно, что, изменяя характеристики $i$-моделей или связей, мы может получить различные внешние и внутренние реакции автомата в ответ на одинаковые воздействия. Так, например, повысив коэффициенты возбуждения всем $i$-моделям двигательной сферы, можно сделать автомат «импульсивным» — он будет часто выполнять действия и мало «думать». Каждый шаг при этом будет обусловлен не всей воспринятой информацией с ее логическим и эмоциональным анализом, а только частичной, поверхностной оценкой наиболее сильных раздражителей. Автомат можно сделать «смелым» или «трусливым», задав определенным образом связи между $i$-моделями сферы восприятий и эмоциональной сферы. Аналогичного эффекта можно добиться, повысив коэффициент возбудимости нужных $i$-моделей эмоциональной сферы автомата.

Таким образом, изменяя параметры элементов М-сети, можно получать автоматы, различным образом реагирующие на сходные внешние воздействия. Это позволяет устанавливать аналогии между типом поведения автомата и характерологическими особенностями поведения человека и говорить (условно), что структура М-сети и значения параметров ее элементов определяют «характер» автомата.

В начале настоящего раздела отмечалось, что все конкретные интерпретации и аналогии мы будем давать только в тех случаях, которые кажутся нам полезными для более полного понимания результатов экспериментального исследования разработанных М-автоматов. Приводя достаточно подробное описание процессов «сознательной» и «подсознательной» переработки информации, мы тем самым стремились создать основу для аналогий, более широких и отвлеченных от конкретной направленности этой книги. Однако детальный анализ этих аналогий, несомненно, выходит за рамки стоящих перед нами задач.

Интерпретируя реализуемые в М-сетях процессы, мы намеренно ограничились рассмотрением психологических аналогий только тех элементов, свойств и функций М-сети, которые уже проверены нами при экспериментальном исследовании разработанных М-автоматов. Это сделано по следующим причинам. Прежде всего, при разработке сложных систем исследователь не может быть заранее уверен в том, что предлагаемые им механизмы или принципы после реализации дадут именно тот эффект, который предполагал-

ся теоретически. Кроме того, мы надеемся, что приведенные выше описания процессов в М-сети и указания на их психологические соответствия послужат основой для проведения дальнейших аналогий и, главное, облегчат чтение ряда описаний экспериментов с М-автоматами, в которых мы широко пользовались терминологией, заимствованной из описаний поведения человека.

## § 4. *Обсуждение*

Рассмотрим особенности изложенного выше языка моделирования с точки зрения требований, предъявляемых к языкам такого рода (подробное обсуждение требований проведено в начале данного раздела).

Предлагаемый язык моделирования является конструктивным — в том смысле этого слова, который был определен ранее. Действительно, для того чтобы построить М-автомат, необходимо в явной форме зафиксировать все предположения и допущения, принимаемые при моделировании, а также определить численные значения используемых в модели параметров. Исходные предположения фиксируются в М-автомате заданием начального набора $i$-моделей и связей между ними (т. е. М-сети); выбором конкретного вида характеристик $i$-моделей и связей и определением набора операций, составляющих алгоритм функционирования $A$. Количественная мера вводится в модель при задании численных значений коэффициентов в выражениях, описывающих характеристики $i$-моделей; связей и СУТ, а также при задании начальных значений проходимостей связей и возбужденностей $i$-моделей.

Предлагаемый язык моделирования ориентирован на широкий класс технических средств реализации действующих моделей. Так, $i$-модель может быть представлена в виде ячейки памяти ЦВМ, хранящей некоторое число, характеризующее возбужденность $i$-модели. Связь также может быть представлена ячейкой (или набором ячеек), в которой зафиксированы адреса соединяемых $i$-моделей и числа, характеризующие проходимость связи. Алгоритм функционирования $A$ и характеристики элементов М-сети также могут быть естественным образом реализованы средствами вычислительной техники. С другой стороны, $i$-модель можно представить физическим устройством, например электронной схемой, обладающей соответствующими характеристиками и вырабатывающей на выходе напряжение, интерпретируемое как показатель возбужденности $i$-модели. Аналогичным образом может быть представлена и связь между $i$-моделями. Алгоритм $A$ в этом случае можно реализовать процессами

в схеме, состоящей из блоков *i*-моделей и связей, а функцию СУТ — работой специальной схемы.

Вообще говоря, М-автомат является информационной моделью и может быть представлен с помощью элементов самой различной физической природы. Существенным в этом вопросе является то обстоятельство, что предлагаемый язык моделирования удобен для представления описываемых с его помощью систем физическими средствами, поскольку предполагает построение большого числа однотипных устройств (*i*-моделей и связей). В то же время этот язык ориентирован и на использование средств вычислительной техники, так что построение сложных и дорогих физических моделей, реализующих М-автоматы, может предваряться исследованием их вычислительных аналогов. Предлагаемый язык моделирования удобен для представления в нем сведений и понятий, определенных содержательно. В самом деле, задание в М-сети связей, соединяющих какую-либо *i*-модель с другими, при содержательной интерпретации соответствует конструктивному определению этого понятия путем указания его отношений с другими понятиями данной системы. Поясним сказанное. Природа человеческих эмоций в настоящее время недостаточно исследована, что зачастую рассматривают как препятствие для моделирования соответствующих сторон психической деятельности. Однако в психологической и художественной литературе существует обширный материал по феноменологии эмоций (например, переживание чувства гнева усиливает двигательную активность, подавляет чувство голода и т. п.). Если ввести в М-сеть *i*-модель, соответствующую понятию «гнев», то можно установить связи между этой *i*-моделью и другими, следуя феноменологическому описанию эмоции гнева, например: к *i*-модели «действовать» — усиливающую связь и т. п. Построенная таким образом система может проявлять признаки «эмоциональности».

Представление содержательных понятий в предлагаемом языке связано с их «конструктивизацией», осуществляемой путем задания связей между *i*-моделями и характеристик элементов М-сети. Связи и характеристики могут быть заданы эвристически, на основе аналогий и правдоподобных рассуждений. В этом случае эффективность принятых предположений может быть проверена в ходе экспериментального исследования действующей модели. Для задания характеристик и связей могут быть проведены также соответствующие психологические или нейропсихологические исследования. В этом случае язык моделирования определяет конкретные цели и направление таких исследований, поскольку указывает, в какой именно форме и какие именно параметры изучаемого явления должны быть определены. Можно сказать, таким образом, что использование аппарата М-сетей

предполагает своеобразную формализацию представляемых в моделях понятий и определяет методы такой формализации.

Предлагаемый язык моделирования позволяет описывать процессы параллельного развития и взаимодействия различных программ переработки информации мозгом. Действительно, задание М-автомата сводится к заданию правил взаимодействия множества формальных элементов, соответствующих корковым информационным моделям, а его функционирование — к реализации этого взаимодействия. Процессы передачи возбуждения между *i*-моделями М-сети являются, таким образом, модельным представлением процессов изменения активностей корковых информационных моделей, в ходе которых и реализуются программы переработки информации в коре. Указанная возможность представляется весьма важной в связи с тем обстоятельством, что подавляющее большинство сколько-нибудь сложных проявлений психической активности и целенаправленной деятельности человека является результатом именно параллельного развития и взаимодействия тех или иных конкретных программ. Соответственно, при моделировании сложной деятельности наиболее перспективный подход связан не с воспроизведением каких-либо отдельных программ, рассматриваемых изолированно от других (например, построения моделей памяти, восприятия, эмоций и т. п.), а, напротив, с воспроизведением сложного взаимодействия различных программ в ходе их параллельного функционирования. Язык М-сетей является, следовательно, адекватным языком моделирования, поскольку ориентирован на решение задач именно такого рода.

Как уже упоминалось, при построении М-автоматов могут быть использованы содержательные данные об объекте моделирования. Формализация таких данных в процессе построения автомата осуществляется поэтапно: вначале они представляются в виде совокупности *i*-моделей и связей, затем определяются характеристики *i*-моделей, проходимости связей и т. д. Понятно, что ошибки и неточности, возникшие при выполнении первого этапа, т. е. при задании М-сети, могут привести в дальнейшем к новым ошибкам и существенно ухудшить качество модели в целом. В ходе проверки модели (оценка поведения, возврат к начальным этапам и их коррекция, см. гл. 1) эти ошибки могут быть обнаружены. Для сложных моделей выполнение циклов проверки связано с большими затратами времени и сил. Поэтому желательно, чтобы средства представления содержательных данных, особенно на начальных этапах моделирования, были сравнительно просты, наглядны и представляли информацию в легкообозримой форме. Именно этим требованиям хорошо удовлетворяет М-сеть, представляющая в графической или таб-

личной (матричной) форме большое количество взаимосвязанных понятий. Предлагаемый язык моделирования позволяет широко использовать при построении М-автоматов данные психологии и нейрофизиологии. Эта возможность обеспечивается тем, что язык удобен для модельного представления данных и понятий, определенных содержательно, позволяет описывать процессы параллельного развития и взаимодействия программ, сравнительно прост и нагляден.

При построении М-автоматов данные конкретных наук о мозге и психике могут быть использованы двояким образом. С одной стороны, их можно применить для задания функциональных характеристик *i*-моделей и связей, для определения правил работы СУТ, для построения специальных алгоритмов, работающих сопряженно с М-сетью (в случае неполных М-автоматов). С другой стороны, эти данные могут быть использованы при задании исходного набора *i*-моделей в М-сети и связей между ними. В ходе последующего обучения и самоорганизации в М-сети могут появляться новые *i*-модели и связи, дополняющие и корректирующие первоначально заданную структуру. Речь идет, таким образом, о том, что предлагаемый язык моделирования позволяет использовать данные конкретных наук для задания осмысленной (неслучайной) начальной организации М-автоматов, для их целенаправленного предпрограммирования. Известно, что такая возможность оказывается чрезвычайно важной при построении сложных самообучающихся систем.

Предлагаемый язык моделирования дает возможность содержательно анализировать процессы переработки информации в М-автоматах. Эта возможность обеспечивается тем, что каждой *i*-модели ставится в соответствие некоторое содержательное понятие, так что в целом М-сеть является сетью с семантикой. Возбужденность *i*-модели в данный момент указывает степень ее влияния (в этот момент) на процесс принятия решения автоматом, т. е. характеризует меру прагматической ценности соответствующей ей информации. Конфигурация и проходимости связей в М-сети определяют «механизм» влияния каждой *i*-модели на общий процесс, или, иными словами, указывают на способ реализации текущих ценностей каждой информационной единицы.

Анализ динамики возбуждений *i*-моделей сети и рассмотрение изменений ее структуры могут быть положены в основу содержательного анализа процессов переработки информации в М-автомате. Существенно, что предлагаемый язык обеспечивает проведение содержательного анализа процессов на разных уровнях общности. Наиболее грубые оценки «хода мышления» М-автомата могут быть получены при рассмотрении работы СУТ. Здесь анализу подвергаются последовательности *i*-моделей или их совокупностей, выделяемых СУТ

в процессе функционирования автомата. Объем используемой для анализа информации в этом случае невелик, что делает его оперативным и доступным даже в случае больших размеров М-сети автомата. Более подробное изучение процессов принятия решений М-автоматом может быть осуществлено путем рассмотрения динамики возбуждений *i*-моделей сети. Совокупность наиболее возбужденных *i*-моделей в данный момент определяет «ведущий комплекс» процесса. Его составляют те «субъективные образы и понятия» автомата, которые оказывают в данный момент наибольшее влияние на ход процесса переработки информации и определяют направление его дальнейшего развития. Путем исследования динамики «ведущего комплекса» можно установить структуру реализуемых автоматом программ. Более глубокий их анализ возможен при рассмотрении изменений проходимостей связей, адаптации и гипертрофии характеристик *i*-моделей и т. п.

Возможность содержательного анализа процессов в М-автомате облегчает также поиск ошибок и неточностей, допущенных при его построении. При использовании предлагаемого языка выявленные ошибки и неточности могут быть исправлены и скорректированы путем внесения частных изменений в структуру М-автомата (изменение проходимостей отдельных связей, параметров характеристик и т. п.), без перестройки модели в целом.

*Глава 5*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Общие принципы и технические приемы проверки сложных гипотез, в ходе которой осуществляются их уточнение, дополнение и корректирование, обсуждались ранее. В этой главе мы рассмотрим некоторые вопросы, возникающие при модельной проверке используемой нами гипотезы о программах разумной деятельности.

В области искусственного разума проверить гипотезу — значит установить, в какой степени предлагаемые ею принципы построения автоматов пригодны для решения задач автоматизации сложных видов человеческой деятельности. Иначе говоря, проверка гипотезы связана с исследованием ее эффективности.

### § 1. *Общие требования к моделям. Стратегии проверки больших гипотез*

Всякая гипотеза оказывается эффективной лишь при решении задач определенного, более или менее ограниченного класса, составляющего область ее применения. Последняя

определяется тем, какие именно конкретные виды человеческой деятельности описывает та или иная гипотеза. Многие гипотезы уже в процессе их построения ориентируются на описания строго ограниченного набора видов деятельности, т. е. на некоторую ограниченную область применения. Что же касается больших гипотез, особенности которых обсуждались в предыдущем разделе и к числу которых принадлежит гипотеза, используемая нами, то они ориентированы на описание весьма разнообразных видов деятельности. Проверка такой гипотезы осуществляется поэтапно, путем построения системы действующих моделей. В процессе построения этой системы, также поэтапно, уточняется и область применения большой гипотезы.

Модельная проверка решения задач практического характера и является, следовательно, теоретическим этапом работ по ИР. На этом этапе, вообще говоря, разрабатываемые модели могут быть предназначены как для решения реальных, практических задач, так и для решения задач, которые носят условный или абстрактный характер. Модель, предназначенная для проверки гипотезы, должна обязательно удовлетворять определенным требованиям.

Для того чтобы исследование эффективности гипотезы оказалось возможным, модель должна воспроизводить *действительно сложные* виды деятельности. К сожалению, объективной оценки сложности не существует. Поэтому приходится требовать, чтобы поведение модели могло быть оценено как разумное в некотором интуитивном понимании. Можно надеяться, что в тех случаях, когда разработанная модель является действительно удачной и интересной, разумность ее поведения может быть установлена ad popolo. Конечно, выполнение этой оценки следует по возможности облегчить путем представления информации о модели и ее поведении в удобной форме, введением вспомогательных показателей и т. п. Отметим еще раз, что указанная трудность возникает лишь на этапе сугубо теоретического исследования. Если модель используется для решения реально существующей хорошо определенной задачи, то разумность ее поведения может быть оценена косвенно — по степени оптимальности вырабатываемых ею решений. Зачастую даже и определяют разумность через оптимальность. Трудность здесь заключается в том, что для многих видов человеческой деятельности, а значит, и деятельности «хорошей» модели достаточно строгие критерии оптимальности определить невозможно без существенных качественных упрощений. А такие упрощения выводят и задачу, и решающую систему из рамок проблемы ИР.

Модель должна строиться в таком виде и решать такие задачи, чтобы на основе ее исследования можно было опре-

делить *область практического применения* проверяемой с помощью данной модели исходной гипотезы. Желательно поэтому, чтобы задачи, решаемые в процессе проверки гипотезы, являлись моделями некоторых практических задач либо были собственно практическими задачами.

Предлагаемая нами гипотеза формулирует ряд общих принципов переработки информации, а также содержит описание набора и структуры основных программ информации. Описывая общие закономерности процессов восприятия, хранения и переработки информации, гипотеза не накладывает каких-либо ограничений на содержательную, смысловую сторону этой информации. Поэтому при построении действующих моделей, предназначенных для проверки гипотезы, необходимо всякий раз задаваться определенной содержательной трактовкой воспроизводимых процессов, реально выполняемых человеком.

Проверка большой гипотезы связана, как это уже упоминалось, с построением некоторой системы действующих моделей. Каждая из таких моделей ориентирована на реализацию и проверку лишь некоторых из основных положений гипотезы. Модели строятся таким образом, чтобы в совокупности они дополняли друг друга, позволяя отобразить в постоянно наращиваемой системе гипотезу в целом. Применение этого принципа «системности» для проверки используемой нами гипотезы предполагает построение действующих моделей, каждая из которых реализует некоторый ограниченный набор программы переработки информации. В соответствии с реализуемым набором каждая модель представляется М-автоматом того или иного типа, использует тот или иной набор характеристик *i*-моделей и связей, тип СУТ и т. д. Таким образом, самой общей характеристикой каждой из предлагаемых в дальнейшем моделей является перечисление реализуемых ею программ.

В зависимости от типа воспроизводимых программ определяются тип и степень разнообразия используемой среды, а также содержательная интерпретация процессов, протекающих в среде и М-автомате в ходе их взаимодействия. Содержательные описания этих элементов составляют как бы «сюжет» моделирования. Выбор такого «сюжета» и совокупности воспроизводимых программ для каждой конкретной модели является весьма важной задачей. При ее решении необходимо иметь в виду, что модель должна удовлетворять как основным, перечисленным выше, так и следующим дополнительным требованиям.

Сложность модели должна быть согласована с возможностями технических средств ее реализации. Иначе говоря, модель не должна быть слишком сложной, чтобы технические трудности ее реализации, наладки и исследования не

явились препятствием на пути к изучению ее свойств и дальнейшему использованию. Опасность такого рода существует всегда при построении моделей сложных видов деятельности и, несмотря на свою очевидность, зачастую не осознается в достаточной мере, что в худших случаях приводит к бесплодным затратам времени и усилий, а в лучших — к появлению запутанных и труднообозримых результатов, толкование которых в значительной мере произвольно. В то же время модель не должна быть слишком простой, чтобы не оказаться безполезной.

Модель должна быть *перспективной*. Это означает следующее. Каждая конкретная модель занимает определенное место в системе моделей, разрабатываемых для проверки гипотезы. Построение данной модели есть лишь один из этапов развития системы. Поэтому нужно, чтобы эта модель или могла быть использована в дальнейшем как основа для построения другой, более сложной и развитой модели, в которую она могла бы войти в качестве составной части (может быть, с некоторыми изменениями), или могла бы дать при исследовании такие результаты, которые непосредственно необходимы для разработки следующих моделей.

Модель должна быть *содержательно оптимальной*. Понятие содержательной оптимальности является интуитивным и обозначает следующее. Пусть разрабатываемая модель занимает какое-то место в определенной системе. Это значит, что некоторое множество моделей данной системы уже создано и в них реализован ряд положений проверяемой гипотезы. Если разрабатываемая модель содержит сравнительно мало нового проверяемого материала, то существует опасность, что расходы на ее разработку не окупятся новыми данными о гипотезе. Иными словами, модель будет в другой форме повторять уже известные результаты. Если же разрабатываемая модель содержит слишком много нового проверяемого материала, то опасность заключается в том, что при ее разработке может оказаться невозможным использовать уже имеющиеся данные и результаты и, кроме того, новые результаты, полученные при исследовании этой модели, могут оказаться слабо связанными с уже имеющимися. Такая модель «разрывает» систему и, будучи изолированной, обладает меньшей ценностью.

Указанные требования носят весьма общий характер и могут быть конкретизированы только в процессе модельного исследования определенной гипотезы, требующей для своей проверки построения системы моделей. Для обеспечения соответствия разрабатываемых моделей этим требованиям целесообразно заранее, до начала моделирования, определить общую структуру будущей системы моделей, т. е. построить стратегию проверки данной гипотезы. Следует отметить, что

в общем случае проверка сложной гипотезы предполагает построение системы путем одновременной разработки нескольких, вначале, может быть, мало связанных друг с другом моделей, предназначенных для проверки отдельных положений гипотезы. Каждая из таких моделей кладет начало некоторой «линии», формируемой из первоначальной модели путем ее дополнения, развития, включения в более сложные системы и т. п. В дальнейшем отдельные линии могут объединяться, между ними могут устанавливаться различного рода связи, так что совокупность моделей, принадлежащих линиям, образует единую систему. Иногда может производиться развитие лишь одной линии моделей.

В нашем случае разработка стратегии проверки включает в себя выбор программ, модельная реализация которых целесообразна в первую очередь, определение соответствующего сюжета моделирования и выбор направления дальнейшего усложнения и развития первоначальных моделей. Изложим некоторые соображения, положенные в основу принятой нами стратегии.

Задача состоит в том, чтобы определить, с чего начинать разработку системы. Первые модели системы, очевидно, должны удовлетворять всем перечисленным выше требованиям, причем вначале выдвигается требование перспективности. Необходимо, следовательно, определить такой объект моделирования, т. е. такой вид человеческой деятельности или такую их совокупность, воспроизведение которой в модели было бы практически осуществимо и обеспечило бы возможность дальнейшего развития и усложнения модели не только «вширь», т. е. путем увеличения объема и разнообразия перерабатываемой ею информации, но и «вглубь» — путем дополнения ее новыми блоками и подсистемами, реализующими новые программы и обеспечивающими воспроизведение моделью новых, более сложных видов деятельности.

В качестве объекта моделирования для первых моделей мы выбрали некоторую достаточно сложную и важную область человеческой деятельности, которую назвали условно двигательным поведением. Дальнейшее изложение будет посвящено содержательному описанию выбранной области и постановке задачи моделирования.

## § 2. *Двигательное поведение как объект моделирования*

Целостную разумную деятельность человека в настоящее время трудно представить какой-либо одной действующей моделью. При выборе объекта моделирования для первых моделей системы необходимо, следовательно, прибегать к

ограничениям и упрощениям. К чему же мы должны стремиться при этом?

Способность человека к разумному поведению является результатом длительного процесса эволюционного развития вида. В ходе этого процесса последовательно формировались все более сложные уровни (этажи) управления приспособительным поведением. Появление новых управляющих систем, новых программ переработки информации мозгом обеспечивало усложнение и совершенствование форм взаимодействия человека со средой. При этом каждый новый уровень, новый механизм управления формировался на основе уже существующих, дополняя и корректируя их деятельность. В иерархии управляющих систем мозга существуют, следовательно, как сравнительно новые управляющие подсистемы, так и старые, определяющие, по-видимому, общие свойства и структуру «базовых» программ разумного поведения. Мы полагаем, что именно эти, исходные подсистемы и программы целесообразно моделировать в первую очередь. В этом случае дальнейшее развитие системы моделей, реализуюшей целостную деятельность, можно было бы организовать по аналогии с развитием управляющих систем мозга, опираясь на анализ этого развития и используя его в качестве прототипа. При рассмотрении иерархии управляющих систем необходимо, однако, учитывать следующее важное ограничение: мы не должны «опускаться слишком низко», поскольку разрабатываемые нами модели являются системами ИР и должны, следовательно, удовлетворять первому из сформулированных выше требований к таким системам, т. е. воспроизводить достаточно сложные виды человеческой деятельности.

**Первое ограничение.** Руководствуясь приведенным выше рассуждением при выборе объекта моделирования, мы исключили из рассмотрения ряд видов разумной деятельности, воспроизведение которых является традиционной задачей ИР: решение формальных задач, доказательство теорем и т. п. Несмотря на очевидную важность проблемы, мы отказались также от моделирования вербальной деятельности человека, полагая, что решение этой задачи может быть получено в более полном виде и с меньшими затратами уже после модельного исследования более глубоких процессов, лежащих в основе речевого поведения. Соответственно, мы отказываемся от моделирования на первом этапе и социально обусловленных видов деятельности.

Объектом нашего рассмотрения являются, таким образом, процессы формирования поведения, связанного с непосредственным взаимодействием человека и естественной среды (в последнюю не включаются другие люди, общественные институты и т. п.). Именно процессы такого рода являются, по нашему мнению, тем исходным материалом, усложнение

и совершенствование которого приводит к развитию высших форм разумной деятельности человека (труда, речи и т. п.). С другой стороны, сложность этих процессов весьма велика, и формируемая ими деятельность интуитивно расценивается как разумная.

**Второе ограничение.** Разнообразие форм взаимодействия человека с естественной средой огромно, и достаточно полное воспроизведение их в единой модели является слишком трудной задачей на начальных этапах построения системы моделей. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только такое поведение, которое связано с передвижением человека в естественной среде. Для того чтобы уточнить, что именно имеется в виду, приведем содержательное описание поведения интересующего нас типа, т. е. опишем «сюжет» моделирования.

Пусть некоторый человек (условный моделируемый субъект) находится в среде, представляющей собой естественную местность (можно представить лес, поле и т. п.), на которой имеются различные объекты. Мы условились уже, что не станем рассматривать взаимодействие человека с другими людьми и искусственно созданными предметами. Предположим, следовательно, что объектов такого рода среда не содержит. В ней находятся, однако, различные объекты естественного происхождения, которые могут вызывать у человека различное отношение к себе. Так, он может пугаться некоторых животных, использовать в пищу различные растения и т. п. Среда содержит, таким образом, как опасные, так и полезные для человека объекты. Человек может осматривать местность, в которой он находится. В зависимости от своего состояния (голод, усталость, эмоциональная напряженность и т. п.) он выбирает на местности конкретную цель, т. е. такую точку или область местности, куда он хотел бы попасть, чтобы удовлетворить те или иные потребности (поесть, отдохнуть). Выбрав цель своего передвижения, субъект планирует деятельность, направленную на ее достижение. Основным элементом плана является маршрут движения к цели. Человек также выбирает и запоминает наиболее удобные ориентиры, с помощью которых он мог бы в дальнейшем контролировать соответствие запланированных и реальных результатов своих действий. Кроме того, он учитывает при планировании изменения собственного состояния, которые могут возникнуть в процессе движения. К ним относятся, например, появление голода, возрастание усталости, изменения эмоциональных состояний при встрече с неприятными ему объектами и др. Таким образом, вырабатываемый человеком план является многокомпонентным. В ходе планирования производится отбор наиболее привлекательных и доступных целей, а также оценка на

основе внутренних критериев различных вариантов маршрута и выбор наилучшего из них.

Построив план, человек приступает к его выполнению, осуществляя реальные действия в среде. Действия, которые он может выполнять, направлены как на перемещения в среде (шаги, прыжки), так и на изменения самой среды. Так, человек может переносить с собой различные объекты (например, пищу), уничтожать некоторые из них, создавать себе временные убежища для отдыха или защиты от опасности.

При построении плана человек использует данные о среде, полученные в результате ее осмотра. В процессе осмотра он, однако, воспринимает лишь неполную информацию об окружающей его местности. Так, он может неверно оценивать расстояние до объектов и их взаимное расположение. Кроме того, чем дальше находится объект, тем хуже он виден, так что некоторые из них могут быть распознаны неверно. На точность узнавания объектов влияет также общее состояние человека. Поэтому, приступив к выполнению плана, он может обнаружить, что составил его не лучшим образом.

Отношение к различным объектам, их оценка зависят от общего состояния человека в момент осмотра, а также от отношения этих объектов к его цели и планам. Поэтому при осмотре местности и выборе маршрута движения человек зачастую принимает субъективные и не всегда наилучшие решения. При выполнении плана это также может привести к тому, что выбранный ранее маршрут движения окажется неудовлетворительным.

В результате всех этих обстоятельств реальные действия человека при достижении цели могут не соответствовать запланированным. Обнаружив отклонения от плана, человек может попытаться восстановить намеченную последовательность действий и построить даже вспомогательный план выхода на предусмотренный заранее маршрут. Он может также скорректировать первоначальный план, учитывая сложившуюся ситуацию. Возможен также и полный отказ от первоначального плана и построение его заново. Если оказывается, что трудности при достижении поставленной цели слишком велики или состояние человека существенно изменилось в процессе ее достижения, он может отказаться от данной цели и начать все сначала, выбрав другую цель.

Если некоторая конкретная цель достигнута, то человек выбирает новую цель, строит план ее достижения и вновь начинает выполнять этот план. Обычно человек не ограничивается стремлением к какой-нибудь единственной цели, а намечает некоторую их совокупность, упорядочивает ее и строит весьма сложные комбинированные планы, учитывая

привлекательность и важность не только основной в данный момент цели, но и некоторой совокупности промежуточных целей и подцелей. В ходе реальной деятельности иерархия целей также может изменяться.

Таким образом, последовательно формулируя цели, планируя, выполняя и изменяя планы, человек организует в среде некоторое целенаправленное поведение, которое в дальнейшем будет условно называться *двигательным*.

В целостном двигательном поведении можно, опять-таки условно, выделить два основных вида деятельности. Один связан с формированием цели и планированием. Для этого вида деятельности характерно восприятие информации с больших участков среды и принятие решений на основе неполных данных. Важным элементом здесь является организация целенаправленного сбора информации: формирование процедуры осмотра среды, определение момента его окончания и т. п. Другим видом деятельности является выполнение плана.

При выполнении плана, как правило, информация воспринимается с меньших участков среды, чем при планировании (человек «смотрит под ноги»), и, соответственно, она более подробна и надежна. Эта информация используется для принятия решений и выполнения «элементарных» двигательных актов: пройти вперед, обойти опасность и т. п. На процесс принятия решений здесь, таким образом, оказывают влияние три основных фактора: информация о состоянии среды в непосредственной близости от человека, информация о выработанном ранее плане и информация о внутреннем состоянии субъекта действия. Интеграция и учет этих факторов при принятии решения и составляют основное содержание деятельности по выполнению плана.

Непосредственно взаимодействуя с объектами, человек узнает их свойства, изучает законы их поведения, формирует представление об их локализации на местности. Эти сведения он реализует впоследствии при принятии решений, так что в ходе выполнения плана им используется информация не только о той ситуации, в которой он находится в данный момент, но и данные об общих свойствах объектов и среды, полученные им ранее.

В процессе выполнения плана человек формирует также общие оценки как местности и содержащихся в ней объектов, так и качества сформированного им плана. На основе этих оценок он принимает решения и относительно выбора тех или иных конкретных действий, и относительно коррекции плана или отказа от него. Сформированные оценки такого рода используются также при последующем планировании.

Рассматривая двигательное поведение как сюжет моделирования, мы, соответственно, должны выбрать в качестве

объекта моделирования ту совокупность процессов переработки информации мозгом человека, которая непосредственно формирует деятельность описанного типа. Тем самым объект моделирования существенно ограничивается. Посмотрим, удовлетворяет ли он после этого предъявляемым к нему требованиям.

Напомним, что основное требование к объекту моделирования сформулировано нами для того, чтобы обеспечить перспективность первых моделей будущей системы. В соответствии с этим требованием при выборе объекта моделирования предпочтение отдается тем информационным механизмам и программам, которые близки к основанию иерархии систем, управляющих человеческим поведением и, следовательно, определяют его наиболее общую структуру и характерные черты. Мы полагаем, что процессы, формирующие двигательное поведение, принадлежат именно такому классу. Основанием для этого мнения служат многие обстоятельства.

Нетрудно заметить, например, что поведение описанного типа присуще целому ряду представителей наиболее высокоорганизованных форм жизни — млекопитающим с хорошо развитой корой головного мозга. Это позволяет полагать, что аналогичными способностями обладали и те из приматов, эволюционное развитие которых привело к появлению вида Homo sapiens. Исследуя двигательное поведение, мы, таким образом, исследуем процессы, лежащие в основе разумного поведения человека. В пользу этого мнения свидетельствует также и то обстоятельство, что поведение описанного типа формируется на сравнительно ранних этапах развития ребенка («двигательный интеллект» по Пиаже [43]).

Хорошо известно также, что формирование «внутреннего плана» действий протекает путем интериоризации предметной деятельности, т. е. деятельности, связанной с непосредственным оперированием объектами внешнего мира [46, 47]. Именно деятельность такого рода является составной частью поведения описанного выше типа. Моделируя ее, мы, следовательно, создаем базу для построения более сложных моделей, представляющих процессы «внутреннего плана», непосредственно лежащие в основе абстрактного мышления.

Исследуя двигательное поведение, мы исследуем также ряд процессов, составляющих основу формирования речи, и создаем тем самым предпосылки для последующего воспроизведения в моделях вербального поведения человека. Естественно, в этом случае необходимо будет рассматривать коллективные формы деятельности людей. Однако каждый индивид такого коллектива должен обладать способностью к самостоятельной организации взаимодействия со средой —

целеполаганию, планированию и т. п., т. е. к организации поведения описанного типа.

Приведенные примеры, число которых можно умножить, подтверждают наше мнение о том, что выбор двигательного поведения в качестве объекта моделирования на начальном этапе построения системы моделей, отображающих разумное поведение, является целесообразным. В то же время ясно, что воспроизведение в одной модели всех процессов, принимающих участие в формировании двигательного поведения (а среди них имеются столь сложные процессы, как распознавание образов, принятие решений, выработка стратегий поведения и т. д.), все еще является слишком трудной задачей. Необходимы, следовательно, дальнейшие упрощения. Выполняя их, мы будем стремиться сохранить соответствие общего характера моделируемой деятельности приведенному описанию.

**Третье ограничение.** Исключим из круга рассматриваемых нами процессов, формирующих двигательное поведение, процессы распознавания образов. Такое ограничение оказывается целесообразным, поскольку, с одной стороны, оно существенно упрощает задачу создания действующей модели, а с другой — не изменяет общую структуру моделируемой деятельности. Остановимся на этом подробнее.

Поясним прежде всего, каким именно образом можно исключить из рассмотрения процессы распознавания. Будем полагать (пока без специальных обоснований), что действующая модель человека, находящегося в определенной среде, реализуется в виде М-автомата. Пусть человек воспринимает некоторый объект среды и узнает его. В результате узнавания оказывается актуализированной, т. е. переходит в активное состояние, корковая информационная модель данного объекта. Этому, естественно, предшествуют некоторые процессы, протекающие в зрительном анализаторе человека и приводящие к активизации одной определенной информационной модели объекта из множества подобных моделей, имеющихся в коре.

Аналогичные процессы в М-автомате должны привести к возбуждению $i$-модели воспринимаемого объекта. Однако реализовать эти механизмы можно по-разному, в зависимости от имеющихся технических возможностей и целей моделирования. Если в нашу задачу не входит модельное исследование анализаторных процессов — а именно в этом и состоит вводимое ограничение,— то мы можем ограничиться воспроизведением в М-автомате не их самих, а лишь формируемого ими эффекта, т. е. возбуждения соответствующей воспринимаемому объекту $i$-модели. Для этого оказывается достаточным реализовать в М-автомате некоторый вспомогательный алгоритм, входной информацией для которого слу-

жат задаваемая заранее таблица соответствий между объектами среды и $i$-моделями М-сети, а также данные о наличии объекта в поле зрения автомата. Работа такого алгоритма состоит в увеличении возбужденности $i$-моделей объектов, находящихся в поле зрения, т. е. в отображении состояний среды в состояния М-сети. Подобный алгоритм, следовательно, позволяет представить в М-автомате эффект узнавания без воспроизведения соответствующих процессов в анализаторе. Ясно, что задача построения такого вспомогательного алгоритма непзмеримо проще, чем задача модельного воспроизведения анализаторных процессов.

Не следует полагать, что, вводя вспомогательный алгоритм, мы полностью отказываемся от воспроизведения процесса узнавания. Этот процесс является многоуровневым, и мы исключаем из рассмотрения только его анализаторный компонент. В поле нашего зрения остаются процессы классификации, предварительной подготовки узнавания (типа установочных), организации осмотра среды и т. п. [24]. В одном из вариантов модели нами рассмотрен случай, когда человек, а следовательно, и конструируемый автомат воспринимают объекты среды не как некоторые целостные образования, а как совокупности отдельных признаков. Здесь наше описание процессов узнавания опускается «на этаж ниже», и объектом моделирования в этом случае становятся программы узнавания объекта среды по неполным наборам его признаков. Каждый из таких признаков считается достаточно сложным (геометрическая конфигурация, наличие наперед заданных особенностей строения объекта, отсутствие последних и т. п.), и его распознавание выполняется вспомогательным алгоритмом. Подобному изучению процессов распознавания образов, с точки зрения обсуждаемой в этой книге гипотезы, посвящено специальное исследование [1, 2]. Полученные при этом результаты могут быть использованы при построении действующих моделей, так что вводимое нами ограничение не носит принципиального характера.

Посмотрим теперь, с какими последствиями связан отказ от воспроизведения в модели процессов распознавания образов. Прежде всего следует отметить, что в этом случае оказывается удобным реализовать действующую модель двигательного поведения в виде программы для ЦВМ. При этом нами учитывалось следующее обстоятельство. Теоретическая часть работ по моделированию включает в себя разработку и описание некоторого М-автомата, реализующего интересующие нас программы переработки информации. Разработанный М-автомат является, вообще говоря, абстрактной конструкцией, в которой зафиксированы правила построения и «принципиальная схема» определенной действующей модели.

В каком виде будет представлена последняя — вопрос удобства. Если это, например, вычислительная система, то в процессе ее экспериментального исследования по сути дела совершенствуется и корректируется не эта именно система, а М-автомат, который она реализует. После отработки М-автомата в его вычислительном представлении мы можем, следовательно, обратиться к его реализации в виде технического устройства, учитывая при этом уже полученные данные о его свойствах. Вопрос о выборе средств реализации М-автомата является, таким образом, не принципиальным и может по-разному решаться на различных этапах исследования. К помощи ЦВМ мы обращаемся именно на этапе первоначального исследования модели двигательного поведения, руководствуясь соображениями удобства и относительной простоты реализации самой модели, а также учитывая различного рода ограничения, необходимые на этом этапе.

Приведенное рассуждение позволяет рассматривать комплекс программ, реализующих М-автомат, как вычислительную модель или действующий макет соответствующего технического устройства. Само это устройство может быть построено «в металле» при выполнении некоторых условий.

Одним из таких условий является разработка эффективных технических систем распознавания образов. Работы в этом направлении ведутся в настоящее время весьма активно [26, 64]. Полученные здесь результаты позволяют надеяться на успех в течение уже ближайшего десятилетия. Интересно, что, уделяя большое внимание проблеме распознавания образов, большинство исследователей недооценивает, а зачастую просто и не осознает принципиальной важности проблемы дальнейшего использования, проблемы «транспорта образов» в решающих системах «разумных машин». Между тем эта проблема отнюдь не менее сложна, чем собственно распознавание, и включает в себя целый ряд вопросов, требующих для своего решения глубокого изучения и осмысливания данных о принципах функционирования прототипа систем ИР — мозга человека. Целесообразно поэтому, одновременно с дальнейшим развитием работ по распознаванию образов, уделять достаточное внимание проблемам построения устройств, которые были бы в состоянии максимально эффективно использовать информацию, вырабатываемую подсистемами распознавания. Мы полагаем, что к устройствам именно такого типа принадлежат М-автоматы.

Другим условием, при выполнении которого физическая реализация модели двигательного поведения оказывается необходимой, является наличие достаточно важных в практическом отношении задач, решение которых может быть осуществлено с помощью модели. Для того чтобы охарактеризовать эти задачи, рассмотрим проектируемый нами М-ав-

томат в качестве вычислительной модели управляющего устройства («мозга») робота, предназначенного для сбора информации или выполнения некоторых работ в естественной среде.

Исследования по созданию нескольких вариантов роботов такого типа в рамках проектов «Искусственный разум» проведены в Массачусетском технологическом институте и Стенфордском университете (США). Существует также серия уже получивших применение роботов-«телехириков» (от греческого «удаленный» и «руки»), управление которыми осуществляется человеком [64]. Опыт разработки и эксплуатации устройств такого типа показал, что одним из центральных вопросов при построении роботов является вопрос не о том, как выполнить то или иное, пусть даже весьма сложное действие, а о том, какое именно из всех возможных действий следует выполнять в той или иной из сложившихся ситуаций.

Речь идет, таким образом, о создании достаточно компактных и быстродействующих устройств, способных самостоятельно принимать решения в сложной изменяющейся обстановке. Задача построения эффективных устройств такого типа до настоящего времени полностью не решена. Ясно, что чем в большей степени развиты рецепторные устройства (в том числе и распознающие), которыми вооружены роботы, тем более разнообразное и гибкое поведение может формировать М-автомат, используемый в качестве «мозга» робота.

В соответствии с тем, что реализация М-автомата будет осуществляться программным способом, должна быть представлена в ЦВМ и среда, в которой находится автомат. Поскольку нашей основной задачей является моделирование двигательного поведения в естественных средах, представленная в ЦВМ «машинная» среда должна являться моделью (может быть, упрощенной) естественных сред некоторого класса. На вопросах определения такого класса мы остановимся позже.

Уточним теперь смысл некоторых из используемых нами терминов. В дальнейшем, говоря о машинной среде, будем иметь в виду реализованную с помощью ЦВМ модель некоторой естественной среды. Говоря об М-автомате, будем иметь в виду действующую модель субъекта, осуществляющего двигательное поведение. Говоря о модели двигательного поведения, будем иметь в виду систему, состоящую из М-автомата и машинной среды.

Программная реализация модели двигательного поведения накладывает определенные ограничения на ее сложность. Эти ограничения связаны с конечностью объема оперативной памяти ЦВМ. Усложнение модели предполагает

увеличение разнообразия среды, в которой действует автомат, т. е. увеличение количества типов и общего числа содержащихся в ней объектов, а также числа *i*-моделей и связей М-сети автомата. Поскольку представление в ЦВМ объектов среды, их взаимного расположения, *i*-моделей и связей предполагает определенные затраты ресурсов машинной памяти, то усложнение модели влечет за собой увеличение объемов памяти. Если разрабатываемая модель оказывается настолько сложной, что для ее машинной реализации необходимо широко использовать долговременные запоминающие устройства, время записи и считывания информации с которых сравнительно велико, то оказывается большим и общее время работы ЦВМ, необходимое для исследования модели. Рост затрат машинного времени может сделать затруднительным или даже практически невозможным достаточно полное исследование модели. Поэтому сложность модели в целом ограничивается сверху объемом быстродействующей памяти ЦВМ, используемой при моделировании.

Принимая решение относительно программной реализации модели двигательного поведения, мы учитывали наличие ограничений такого рода. Предварительные расчеты показали, что современные вычислительные машины (были использованы ЦВМ М-220 и БЭСМ-6) обеспечивают возможность исследования моделей, сложность которых достаточна для достижения основных целей предпринимаемой работы.

Использование в модели двигательного поведения вспомогательного «распознающего» алгоритма, для работы которого необходимо заранее установить и зафиксировать на все время исследования определенное соответствие между объектами среды и некоторыми из *i*-моделей М-сети, накладывает определенные ограничения на допустимое разнообразие среды, представляемой в модели. Действительно, каждому типу объекта ставится в соответствие определенная *i*-модель. С увеличением разнообразия среды, т. е. с введением новых типов объектов, растет и число соответствующих им *i*-моделей. При этом, естественно, увеличивается и используемый объем машинной памяти. Рост же последнего, как уже отмечалось, лимитирован. Ограничение может быть существенным образом ослаблено, если объекты среды задаются с помощью конечного набора признаков. В этом случае также каждому из признаков ставится в соответствие своя *i*-модель, но общее число признаков здесь может быть невелико, в то время как количество задаваемых с их помощью типов объектов может оказаться весьма большим. Использование такого приема задания объектов предполагает, правда, включение в М-сеть некоторого числа дополнительных *i*-моделей и связей, реализующих операции обработки воспринятых признаков. Этот прием оказывается целесообразным в тех

случаях, когда мы стремимся к заданию среды, обладающей весьма значительным разнообразием.

Использование в модели вспомогательного «распознающего» алгоритма приводит также к еще одному существенному ограничению. Оно состоит в том, что М-автомат, применяющий этот алгоритм, не может «воспринять» нового, т. е. не включенного заранее в таблицу соответствий, объекта. Для такого объекта в М-сети просто не существует отдельной *i*-модели, а следовательно, такой объект не существует для М-автомата. Итак, мы вынуждены отказаться от исследования (в рамках избранного сюжета моделирования) процессов, связанных с формированием человеком образов незнакомых объектов.

Как и в предыдущем случае, указанное ограничение частично снимается, если задавать объекты с помощью наборов отдельных признаков. Здесь автомат «не видит» только новые признаки, но если среди признаков объекта имеются хотя бы некоторые из «известных» автомату, то такой объект может быть воспринят и опознан по неполному набору признаков.

Обсуждаемое ограничение не является, вообще говоря, обязательным или непреодолимым при моделировании с помощью М-сетей. В самом деле, как упоминалось выше, одним из механизмов самоорганизации в М-автоматах является механизм формирования новых *i*-моделей сети, так что каждая из них может формироваться как отображение нового объекта или признака. Не связано с принципиальными затруднениями и построение специального алгоритма, дополняющего и корректирующего таблицу соответствий, используемую алгоритмом «распознавания». Таким образом, моделирование программ формирования новых образов возможно и в рамках выбранного сюжета. Мы, однако, отказываемся от воспроизведения программ такого типа в нашей модели и делаем это именно с целью упрощения сюжета моделирования. Основанием для такого упрощения служит то обстоятельство, что упомянутые программы, будучи, вообще говоря, весьма важными и интересными, не принимают обязательного и постоянного участия в процессах планирования, принятия решений и т. п. Смысл вводимого ограничения состоит, таким образом, в следующем. Будем полагать, что все объекты среды, в которой организует двигательное поведение наш условный субъект, известны ему и могут быть правильно опознаны им, если будут восприняты.

Программная реализация модели двигательного поведения предполагает, естественно, программную же реализацию и эффекторных систем М-автомата. Под эффекторными здесь следует понимать такие системы, которые непосредственно реализуют воздействия автомата на среду. Если бы М-ав-

томат выполнялся в виде технического устройства, такие системы были бы представлены теми или иными его движителями (колесами, гусеницами и т. п.) и манипуляторами. При программной же реализации будем представлять их некоторыми вспомогательными алгоритмами, которые запускаются при принятии М-автоматом решения о выполнении определенного действия и в ходе своей работы моделируют это действие, производя перемещения автомата в среде или осуществляя в последней соответствующие изменения.

В общем случае управление эффекторными системами является многоуровневым, так что М-сеть автомата должна содержать *i*-модели «элементарных» действий (соответствующих, например, сокращению различных мышц двигательного аппарата человека), *i*-модели более сложных двигательных актов и программ, предполагающих упорядоченное выполнение «элементарных» действий (например, сгибание руки), а также *i*-модели «идей» различных действий и поступков (сделать шаг, взять, напасть и т. п.). В целях упрощения разработки будем включать в М-сеть нашего автомата только *i*-модели последнего типа, т. е. *i*-модели достаточно сложных действий, реализуя с помощью вспомогательных «эффекторных» алгоритмов как их конечный результат (изменения положения автомата в среде и самой среды), так и соответствующие им изменения внутреннего состояния автомата.

**Четвертое ограничение.** Упрощения, которые мы сейчас рассмотрим, возникают при переходе от описания естественной среды к конструктивному заданию машинной среды.

Для начала представим себе машинную среду в виде карты той местности, на которой находится наш условный субъект. На такую карту могут быть нанесены обозначения различных объектов среды. В зависимости от масштаба карты, т. е. от уровня описания среды, может изменяться и содержание понятия «объект среды». Так, при одном масштабе в качестве целостного, неделимого объекта, внутренняя структура которого нас не интересует, может выступать, к примеру, имеющийся в среде лес. На карте в этом случае могут быть сделаны пометки, обозначающие общие характеристики такого объекта: «лес труднопроходимый», «здесь водятся опасные звери» и т. п. При другом, более крупном масштабе объектом может стать уже отдельное дерево, а пометки будут обозначать его свойства: «дерево высокое», «имеются съедобные плоды» и т. п. Очевидно, использование карт того или иного масштаба зависит от целей описания среды, т. е., в нашем случае, от степени подробности, с которой мы намерены описывать и воспроизводить в моделях феномены двигательного поведения.

В процессе работы с М-автоматом может возникать необходимость использовать различные среды. Особенно часто это происходит при решении всякого рода прикладных задач. Так, одна и та же модель, способная строить планы и принимать решения, может применяться в одном случае для выбора, например, трассы многокилометрового трубопровода, а в другом — для автоматического управления передвижением электрокара по территории заводского цеха. Поэтому желательно разработать такой способ задания машинной среды, который служил бы по мере необходимости в качестве модели разных естественных сред, описанных с разной степенью подробности. Будем представлять машинную среду в виде совокупности одинаковых квадратных клеток, регулярно расположенных на плоскости (как клетки шахматной доски). Такая совокупность клеток составляет «пространство», в котором будет действовать автомат, и является «заготовкой» карты местности. Для того чтобы построить последнюю, необходимо внести в соответствующие клетки знаки тех или иных объектов и их характеристик.

Условимся, что в одну клетку машинной среды может быть внесено не более одного знака объекта. Таким образом, клетка оказывается «элементарной» единицей автоматного пространства. Кроме знака объекта, в клетку среды могут быть внесены некоторые дополнительные знаки, характеризующие уже не отдельный объект, а общее состояние данного участка среды. Знаки такого рода могут указывать, например, высоту данного участка относительно некоторого условного уровня, его температуру, освещенность и т. п.

Таким образом, располагая в клетках определенные знаки, мы задаем среду, в которой предстоит действовать автомату. Совокупность упомянутых знаков содержит информацию, исходную для модели двигательного поведения. Это означает, что при исследовании модели имеется возможность «помещать» ее в среды различной сложности, содержащие различные объекты, т. е. организовывать те или иные условные экспериментальные ситуации в зависимости от целей исследования. С другой стороны, варьируя набор и размещение используемых знаков, можно приводить машинную среду в определенное соответствие с различными естественными средами, т. е. моделировать их.

На этапе наладки и исследования основных свойств модели двигательного поведения разнообразие знаков, используемых для задания различных вариантов машинной среды, может быть ограничено. Такой ограниченный набор знаков определяет конкретную содержательную интерпретацию процессов в модели и будет подробно описан при обсуждении каждого из ее вариантов. В самых общих чертах содержа-

тельная характеристика используемых в дальнейшем сред состоит в следующем.

Рассмотрим среды, содержащие условные объекты, «полезные» и «опасные» для автомата. Этим объектам даны определенные названия, например: «пища», «зверь», «убежище». Для того чтобы иметь возможность широко варьировать разнообразие и сложность задач, решаемых автоматом в среде, будем считать, что существуют однотипные объекты, в разной степени полезные или опасные для него. Так, можно различать более или менее опасных «зверей». Каждому объекту приписаны определенные свойства. Столкновение со «зверем», например, вызывает у автомата «боль».

Это, безусловно, не означает, что разрабатываемые модели могут использоваться только для решения условных задач. Выбор относительно простой и интуитивно понятной содержательной интерпретации объектов среды («зверь», «пища» и т. п.) обусловлен только удобством моделирования. В самом деле, принимая такую интерпретацию, мы получаем возможность использовать при задании внутренней организации автомата богатый индивидуальный опыт людей, а также различного рода наблюдения, правдоподобные рассуждения, аналогии, описания, имеющиеся в художественной и психологической литературе, и т. п. Практическое же использование моделей, как уже упоминалось, обеспечивается возможностью приведения машинных сред к виду, соответствующему различным по составу и сложности естественным средам.

Следует отметить, что представление машинной среды в виде совокупности отдельных клеток является частным случаем задания сред с помощью более общих методов, например графов. Практическое использование этих методов при моделировании двигательного поведения было бы, однако, менее наглядным, так что по соображениям простоты и удобства «клеточное» задание представляется более целесообразным. Что же касается возможностей соотнесения «клеточной» среды с естественной, то они оказываются достаточно гибкими, поскольку каждой отдельной клетке можно поставить в соответствие участки естественной среды различных (в зависимости от целей исследования) размеров, в том числе и весьма малых. В предельных случаях «клеточная» среда может обеспечить практически непрерывное описание естественной.

Дальнейшее упрощение работ связано с введением еще одного ограничения. Оно состоит в следующем. Будем считать, что однажды заданная машинная среда в процессе проведения эксперимента с моделью остается неизменной, если не считать тех изменений, которые вносятся в нее работой автомата (например, при выполнении им действий

типа «переместить объект»). Иначе говоря, будем считать среду статической. Это означает, что объекты машинной среды не обладают собственной активностью, т. е. не могут самостоятельно перемещаться в среде, взаимодействовать, выполнять какие-либо действия, направленные на автомат, и т. п. Все особенности того или иного объекта, определяющие характер его «физического» взаимодействия с автоматом, задаются при этом путем предварительного перечисления свойств объекта, вносимых в среду при ее задании в виде набора специальных знаков.

Приведем пример. Одно из свойств объекта «зверь» состоит в том, что он вызывает у автомата «боль», если оба они оказываются в одной клетке среды. Содержательно это может, например, обозначать, что зверь нападает на нашего условного субъекта. Упрощение, по существу, состоит в предположении о том, что зверь нападает на субъекта всегда, если только они оказываются достаточно близко. Следовательно, можно не представлять в модели ни процессы принятия решений зверем, ни его двигательную активность. Достаточно лишь смоделировать конечный результат нападения — возникновение боли у субъекта. А для этого достаточно считать способность вызывать боль постоянным свойством зверя и при задании машинной среды всегда помечать соответствующим знаком клетку, в которой находится объект «зверь». Аналогичным образом определяются и другие свойства объекта «зверь», а также свойства остальных объектов машинной среды.

При соотнесении машинной среды определенной естественной среде обсуждаемое ограничение выступает в виде предположения о том, что объекты естественной среды либо вообще не являются активными, либо их активность ограничена таким участком среды, который соответствует одной клетке машинной модели. Можно считать, например, что тот же зверь способен перемещаться в пределах ограниченного участка местности и встреча его с условным субъектом происходит всегда, если только последний при своих передвижениях по местности пересекает соответствующий ее участок.

Следует подчеркнуть, что свойство статичности среды сохраняется лишь в рамках одного, отдельно взятого, эксперимента. При постановке ряда экспериментов с моделью машинная среда может всякий раз задаваться по-новому.

Использование статических сред позволяет нам не воспроизводить при моделировании тех программ переработки информации, которые непосредственно связаны со способностью человека к решению задач экстраполяции. В полной мере это упрощение относится к программам сознания в той их части, которая обеспечивает ориентировку человека во

времени. Соответственно, при реализации модели двигательного поведения с помощью необучающегося М-автомата способности к экстраполяции представлены в ней не будут. Такой автомат может, вообще говоря, организовывать поведение и в динамической среде, однако принимаемые им решения будут основываться лишь на анализе данных одномоментных восприятий ее состояния. Иначе говоря, необучающийся М-автомат будет воспринимать динамическую среду как дискретную последовательность статических сред. При этом он окажется не в состоянии выделить общие закономерности происходящих изменений и, следовательно, не сможет использовать их при планировании и принятии решений.

При использовании М-автомата с обучением и самоорганизацией дело обстоит несколько иначе. В этом случае автомат также не содержит специальных *i*-моделей и функциональных структур, обеспечивающих функцию предсказания. Однако в процессе его самоорганизации элементы такого рода могут быть сформированы. В дальнейшем эта возможность будет проиллюстрирована экспериментальным исследованием процесса повторения последовательностей М-автоматом. Значение этого примера состоит в том, что способность к повторению последовательности предполагает наличие в автомате внутренней информационной модели соответствующего временного процесса. С другой стороны, существование такой модели является необходимым условием также и любого предсказания. Следовательно, определенные возможности воспроизведения программ ориентировки во времени возникают при использовании М-автоматов даже без специальной предорганизации. Можно полагать, таким образом, что поведение обучающихся М-автоматов в динамических средах будет отличаться от поведения необучающихся, являясь более «разумным». Последовательным изучением этого вопроса мы, однако, не занимались, ограничиваясь на начальных этапах моделирования изучением основных свойств М-автоматов, проявляющихся при их функционировании в сравнительно простых статических средах.

**Окончательный вариант модели двигательного поведения.** Итак, после всех введенных ограничений окончательный вариант модели двигательного поведения может быть кратко описан следующим образом.

Модель выполняется в виде программы для ЦВМ и содержит две подсистемы: машинную среду и М-автомат. Машинная среда является статической и задается в виде упорядоченной совокупности клеток, каждая из которых может быть либо пустой, либо содержать в себе один из объектов, в различной степени «полезных» или «опасных» для автомата. Машинная среда может являться моделью некоторых естественных сред.

М-автомат является моделью некоторого (условного) субъекта, осуществляющего двигательное поведение в естественной среде, соответствующей машинной. М-сеть автомата предварительно организована и содержит *i*-модели объектов, которые имеются в среде, *i*-модели действий, которые он может выполнить, а также *i*-модели, соответствующие различным образам, понятиям, чувствам, эмоциям и желаниям моделируемого субъекта.

В каждый момент дискретного времени автомат находится в одной из клеток среды и может производить ее «осмотр». «Поле зрения» автомата (количество одновременно рассматриваемых клеток среды) ограничено. В процессе осмотра автомат перемещает поле зрения по клеткам среды, причем воспринимает тем меньше признаков объектов, чем они дальше от него.

На основе данных осмотра автомат намечает цель (клетку или совокупность клеток среды), достижение которой позволит удовлетворить его стремление к пище, отдыху, безопасности и т. п. Автомат может формировать также иерархии целей. Затем он строит планы достижения целей и принимает решение о выполнении того из них, который наиболее полно удовлетворяет ряду формируемых автоматом критериев. В качестве критериев могут выступать безопасность маршрута, его длина и т. п.

Построив план, автомат приступает к его выполнению, передвигаясь из одной клетки среды в другую. При этом считается, что поле его зрения ограничено клетками, соседними с той, в которой он находится в каждый данный момент. В процессе передвижения автомат принимает решения о выполнении в каждый момент одного из возможных действий, а также о коррекции или полной перестройке имеющегося плана.

Передвигаясь в среде, автомат стремится избегать опасных объектов, чередует движение и отдых, удовлетворяет голод, преодолевает препятствия и т. п. Автомат способен использовать собственный прошлый опыт. Мотивом его деятельности служит задаваемое ему изначально стремление к самосохранению.

В различных вариантах модели двигательного поведения описанный сюжет представлен с различной степенью полноты.

Из приведенного описания следует, что функции, реализуемые автоматом, могут быть отнесены к таким основным видам проявлений разумной деятельности: направленное восприятие, целеполагание и планирование, принятие решений при организации конкретных действий в среде.

В автомате воспроизводятся следующие из основных программ переработки информации мозгом человека (изложение

ведется в соответствии с разработкой этого вопроса, данной в работе [5, стр. 63—121]).

1. Программа восприятия внешней информации. В автомате эта программа представлена такими подпрограммами: настройка анализаторов (при организации осмотра среды), узнавание (возбуждение *i*-моделей объектов, если восприняты их признаки, а также возбуждение *i*-моделей понятий более высокого уровня, если восприняты объекты); запоминания (формирование новых *i*-моделей и связей в М-сети, а также формирование внутренней модели среды); вспоминания (выделение СУТ *i*-моделей отдельных образов объектов, их совокупностей и последовательностей, а также понятий различных уровней); предвидения (формирование «цепочек» *i*-моделей, отражающих последовательности воспринимаемых событий, и влияние возбуждения таких «цепочек» на процессы в сети).

2. Программа чувств. Представлена в автомате процессами возбуждения *i*-моделей чувств «от тела»: передачей возбуждения между *i*-моделями чувств и *i*-моделями образов, понятий, желаний и действий, что составляет «эмоциональный» компонент процесса переработки информации М-сетью; установлением новых связей между *i*-моделями чувств и другими *i*-моделями сети. Основные подпрограммы этой программы связаны с инстинктами и сложными рефлексами. В автомате представлен инстинкт самосохранения с его подпрограммами защиты и питания. Из подпрограмм, соответствующих сложным рефлексам, представлены рефлекс цели, обеспечивающий общую направленность деятельности автомата, рефлекс свободы, организующий деятельность автомата по преодолению имеющихся в среде препятствий и ограничений, и рефлекс любопытства, определяющий структуру процессов осмотра среды.

3. Программа действий. Представлена в автомате совокупностью простых безусловных рефлексов и подпрограмм: связывания (формирование условных рефлексов), предвидения (формирование плана), контроля действий (функционирование во время выполнения плана следящих систем «по чувствам» и «по результатам»), многоуровневого анализа вариантов (наличие в М-сети *i*-моделей действий различной степени общности — от «идей» до «элементарных» действий и связь этих *i*-моделей с другими); построение планов разных уровней.

4. Программа сознания. Представлена в автомате подпрограммами внимания (СУТ), ориентирования в пространстве (построение и использование внутренней модели среды), волевого действия (наличие *i*-моделей желаний, чувств и действий, построение плана и выполнение его с преодолением препятствий, а также автономный выбор цели, построение

иерархии целей и последующие изменения их), отделения реального и нереального (при обращении к внутренней модели среды и планировании), моделирования собственных действий (при планировании).

Упомянутые программы имеют следующие общие черты: в исходном состоянии автомата все они задаются введением в М-сеть определенных «врожденных» *i*-моделей и связей, а для неполных автоматов — специальных алгоритмов. Общим принципом организации всех программ является этажность, или многоуровневость. В процессе работы М-автомата программы могут усложняться и дополняться за счет формирования новых *i*-моделей и связей. Каждая программа реализуется определенными, «своими» *i*-моделями и связями. Одни и те же *i*-модели и связи могут участвовать в реализации различных программ.

Следует отметить, что приведенное перечисление программ и подпрограмм не является полным. С одной стороны, различные подпрограммы представлены в рамках принятого сюжета моделирования в разной степени, причем некоторые — в весьма незначительной. С другой стороны, автомат реализует много других, не отмеченных при перечислении подпрограмм, принадлежащих более низкому (по сравнению с упомянутыми) уровню. Более полное представление об объеме программ можно составить на основе подробного рассмотрения работы его конкретных действующих реализаций, описание которых приводится ниже. Посмотрим теперь, в какой степени предлагаемая модель двигательного поведения соответствует общим требованиям к моделям гипотез (см. выше).

Одно из основных требований состоит в том, что модель должна воспроизводить действительно сложные виды человеческой деятельности. В противном случае она не может быть использована для проверки эффективности исходной гипотезы. Мы полагаем, что перечисление программ переработки информации, реализуемых с помощью предлагаемого автомата, свидетельствует о достаточной сложности решаемых проблем, так что первое требование можно считать выполненным.

Требуется далее, чтобы на основе исследования модели можно было определить область практического применения проверяемых с ее помощью принципов исходной гипотезы. Уже упоминалось, что рассматриваемая нами условная задача организации двигательного поведения М-автоматом по своей структуре и проблематике весьма близка к практической задаче автоматизации управления передвижением в естественной среде различного рода информационных и транспортных средств. Иначе говоря, наша вычислительная модель М-автомата может быть рассмотрена как действующий

макет реального устройства управления движением, а полученные результаты могут быть непосредственно использованы при конструировании такого устройства. Можно также отметить, что принципы построения М-автоматов могут быть применены при решении класса практических задач, интерпретируемых как общая задача поиска путей в пространствах параметров произвольной природы. Класс таких задач достаточно широк, и в него входит ряд важных задач автоматического управления. Вопросы практического использования разработанной модели мы еще рассмотрим в дальнейшем. Сказанного, однако, достаточно, чтобы уже теперь считать выполненным обсуждаемое требование.

Следующее важное требование предполагает перспективность модели. Выполнение этого требования обеспечивается тем обстоятельством, что воспроизводимые в предлагаемом автомате программы переработки информации лежат в основе более сложных проявлений разумной деятельности человека (труд, речь). Подробнее этот вопрос обсуждался выше (см. «Второе ограничение»). Задачи воспроизведения более сложных видов деятельности могут, следовательно, решаться путем дальнейшего развития и усложнения предлагаемой модели и с учетом результатов, полученных при ее исследовании.

Основные требования, предъявляемые к предлагаемой модели, оказываются, таким образом, выполненными, что позволяет использовать приведенное выше описание сюжета моделирования в качестве содержательной основы для построения действующей модели двигательного поведения. Формальная постановка задачи моделирования дана в работе [6].

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

# Экспериментальное исследование поведения М-автоматов

*Раздел III*

## М-АВТОМАТ РЭМ. ФОРМИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Нами разработаны два варианта действующей модели двигательного поведения. Первый из них — М-автомат РЭМ. С помощью этой модели необходимо было экспериментально проверить наиболее важные представления исходной гипотезы: принципы организации М-сети как устройства, осуществляющего параллельную переработку информации; принципы работы СУТ и ее роль в функционировании М-автомата; способы организации взаимодействия между М-сетью и алгоритмическими (функциональными) моделями, т. е. методы построения неполных М-автоматов; многоуровневую структуру информационных систем, реализующих процессы принятия решений, и др.

Экспериментальное исследование РЭМа должно было ответить на вопрос о том, в какой мере эффективен предлагаемый подход к построению систем искусственного разума, а также определить пути дальнейшего усовершенствования модели.

При разработке РЭМа были введены дополнительные ограничения на сюжет моделирования и набор воспроизводимых автоматом программ переработки информации. В частности, РЭМ реализован как необучающийся и неполный М-автомат. Одна его часть, воспроизводящая процессы восприятия и планирования, выполнена в виде алгоритмической модели, а другая, воспроизводящая процессы принятия решений в ходе выполнения плана,— в виде полного М-автомата. Обе части относительно самостоятельны и могут быть названы моделями планирования и выполнения плана соответственно.

Функционирование РЭМа как целостной модели двигательного поведения организуется в ходе последовательного (поочередного) функционирования моделей планирования и выполнения плана. Автомат представляет собой упрощенный вариант модели двигательного поведения, ее, так сказать, первое приближение.

Название автомата — РЭМ — относится к целому классу автоматов, задаваемых одним и тем же описанием (программой).

*Глава 6*

## МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ РЭМ

Разработка этой модели рассматривалась нами как первый этап создания «разумного» автомата. В связи с этим мы существенно ограничили функции РЭМа и отразили в нем только наиболее важные, с нашей точки зрения, программы переработки информации, необходимые для организации целенаправленного двигательного поведения в средах, близких к естественным.

## § 1. *Блок-схема модели*

Общая блок-схема модели РЭМ показана на рис. 11. Автомат помещен в среду, каждая клетка которой может содержать не более одного объекта. Количество различных типов объектов фиксировано. В среде РЭМ может совершать только действия по перемещению из одной клетки в другую — соседнюю. При этом он может «ходить» как по пустым, т. е. не содержащим объекты, клеткам, так и по тем клеткам, в которых уже находится какой-либо объект. Однако это только принципиальная возможность «свободы действий». Задачей РЭМа является выбор такого пути передвижения, который обеспечил бы ему сохранение целостности и минимум отрицательных «эмоциональных переживаний». Иначе говоря, ему не безразлично, какие действия-шаги выполнять в тех или иных ситуациях.

В М-сети РЭМа имеются *i*-модели всех типов объектов внешней среды, и восприятие одного из них отражается в возбуждении соответствующей *i*-модели. Блок восприятия организован таким образом, что для каждого пространственного положения объекта относительно автомата существует своя *i*-модель. Это позволяет автомату не только «узнавать» объекты, но и учитывать их пространственную ориентацию при выборе определенных действий. Процесс восприятия РЭМом информации из внешней среды назовем «осмотром».

В поведении РЭМа можно выделить два основных этапа — выбор плана передвижения и выполнение этого плана. В соответствии со спецификой каждого этапа существуют и два режима работы блока восприятия, т. е. два различных режима осмотра внешней среды. Общая цель движения задается РЭМу экспериментатором в виде координат определенной клетки среды. В процессе планирования автомат производит осмотр достаточно большого участка среды и в том случае, если конечная цель движения находится за пределами этого участка, намечает себе промежуточную цель и строит план ее достижения. При выполнении плана, т. е. при непосредственном передвижении в среде, РЭМ после каждого шага осматривает только окружающие его клетки среды. На основе воспринятой при осмотре информации и ранее выработанного плана он принимает решение о выполнении следующего действия-шага.

Как видно из блок-схемы РЭМа, информация о результате осмотра (в случае планирования) или о плане и осмотре (в случае выполнения плана) не является единственной, на основе которой автомат принимает решения о действиях в среде. Прежде чем принимается какое-либо решение, воспринятая информация подвергается «логической» и «эмоциональной» оценкам в блоках эмоциональной оценки и поня-

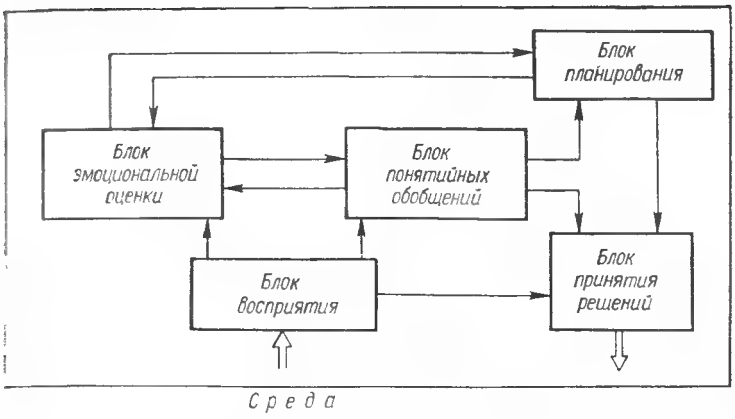



Рис. 11. Блок-схема модели РЭМ.

тийных обобщений. Это обеспечивает автомату, во-первых, возможность учитывать свой предыдущий опыт, выраженный в структуре М-сети и определенном распределении возбуждений составляющих ее *i*-моделей, и, во-вторых, возможность самостоятельно оценивать значимость воспринятой информации. Таким образом, каждое принимаемое автоматом решение о выборе определенного этапа плана или конкретного действия-шага является результатом сложных и взаимосвязанных процессов, протекающих в его М-сети.

При разработке РЭМа намеренно были исключены из рассмотрения такие важные аспекты разумного поведения, как обучение, самоорганизация, ориентирование во времени и т. п. Это позволило создать сравнительно простую модель, разработка и исследование которой могли быть проведены без больших затрат времени. В то же время представленные в РЭМе программы переработки информации достаточно полно отражают основные положения исходной гипотезы, и экспериментальное исследование автомата позволило оценить эффективность их использования в более сложных вариантах моделей разумного поведения.

Построение РЭМа в виде необучающегося М-автомата обусловило необходимость ряда ограничений в его структуре и функциях. Так, например, мы вынуждены были отказаться от введения в автомат программ, связанных с активной деятельностью в среде, существенно ограничили количество *i*-моделей в М-сети, упростили характеристики *i*-моделей и связей. Кроме того, некоторые функции РЭМа оказалось более удобным представлять в виде алгоритмических описаний. Прежде всего это относится к функции планирования. Предварительные исследования показали, что реализация процесса планирования в М-сети принципиально осуществима, однако требует значительных затрат времени, больших

объемов оперативной памяти ЦВМ и, самое главное, неперспективна без реализации функций обучения и самоорганизации. Поэтому блок планирования РЭМа выполнен в виде функционального описания соответствующего процесса.

Таким образом, РЭМ является неполным необучающимся М-автоматом, в котором блоки восприятия, понятийных обобщений, эмоциональной оценки и принятия решений представлены в виде взаимосвязанных сфер М-сети, а блок планирования — в виде взаимодействующего с сетью алгоритма. Использование принципиально отличного от сетевого способа реализации функций планирования в автомате позволило оценить возможность и эффективность построения неполных М-автоматов. Оказалось, что организация оперативного взаимодействия алгоритмических и сетевых блоков автомата может быть осуществлена сравнительно простыми средствами. Этот вывод был использован нами в дальнейших работах по созданию систем, способных к разумному поведению.

Несмотря на то что РЭМ выполнен в виде неполного М-автомата, его основой все же является М-сеть. Именно в результате протекающих в сети процессов производится оценка воспринимаемой извне информации, учет плана и опыта предыдущей деятельности и выработка новых решений о выполнении конкретных действий или выборе нового плана поведения. То обстоятельство, что одна и та же М-сеть используется и при планировании, и при выполнении плана, позволяет автомату строить такие планы поведения, которые соответствуют его «субъективному» восприятию среды. В процессе движения «эмоциональная» оценка тех или иных объектов среды может измениться, что приведет к необходимости коррекции или перестройки плана. В этом случае новый план будет построен уже с учетом изменившихся «эмоциональных» оценок объектов.

Эффективность различных действий автомата в значительной мере зависит от того, каким образом организована его М-сеть, т. е. насколько обоснованно и согласованно с общей задачей автомата выбраны *i*-модели и связи сети, их характеристики и законы взаимодействия. Для необучающегося М-автомата этап задания организации М-сети является наиболее важным, поскольку в процессе функционирования структура сети автомата остается неизменной. Именно поэтому подробное описание автомата РЭМ мы начнем с рассмотрения принципиальной схемы структуры и динамики его М-сети. Конкретные содержательные интерпретации объектов среды, в которой функционирует РЭМ, и содержательное описание структуры сети автомата будут приведены несколько позже. На этом этапе, т. е. при описании принципиальной схемы М-сети, будем пользоваться пока только

теми сведениями, которые уже изложены относительно блок-схемы автомата. Будем также считать, что существует М-сеть, соответствующая этой блок-схеме, а также тем общим задачам, для решения которых строится автомат.

## § 2. *Структура М-сети автомата*

Структура М-сети автомата может быть сопоставлена с плоским связным, ориентированным графом, узлы которого соответствуют элементам структуры — $i$-моделям, а ребра — функциональным связям между ними. В соответствии с блок-схемой произведем условное разделение М-сети автомата на три сферы — логическую (блоки восприятия и понятийных обобщений), эмоциональную (блок эмоциональных оценок) и двигательную (блок принятия решений).

**Сфера логики.** Логическая сфера представляет собой иерархически организованную структуру, первый уровень которой составляет множество $i$-моделей $R = \{r_1, r_2, \ldots, r_n\}$, изоморфное множеству объектов внешней среды $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$.

Восприятие человеком некоторого объекта из естественной среды сопровождается осознанием пространственного положения последнего. Поскольку информация о пространственном положении объекта необходима для организации адекватного поведения, элементы множества $R$ выбраны таким образом, что каждый элемент $r_i \in R$ соответствует объекту $a_i$, имеющему определенный пространственный признак (например, $a_i$ слева и т. п.). Зафиксируем в среде определенную систему координат: верх, низ, левая сторона, правая сторона и пронумеруем все клетки среды слева направо и снизу вверх. В пространственном представлении такая среда имеет вид цилиндра с винтовым расположением клеток. Положение любой клетки окрестности автомата может быть определено относительно последнего однозначным образом. Пусть автомат расположен в клетке $g^i$. Среда организована так, что окрестность автомата всегда составляет девять клеток — в одной из них расположен автомат, а восемь остальных непосредственно к ней примыкают. Обозначим клетку, в которой расположен автомат, через $g^9$, а примыкающие к ней клетки начиная с нижней последовательно, по часовой стрелке, — $g^1, g^2, \ldots, g^8$. Тогда произвольный объект $a_i$, расположенный в окрестности автомата, можно записать в виде $a_i^j$, где $j (j = 1, 2, \ldots, 9)$ означает пространственное положение объекта относительно автомата (например, $a_1$ — объект $a_1$ сверху). Восприятию объекта $a_i$ в клетке $g^j$ соответствует возбуждение элемента $r^i$ в М-сети

автомата (например, возбуждение $r_1^3$ свидетельствует о том, что автоматом воспринят объект $a_1$ слева).

Каждая клетка среды может также характеризоваться двумя дополнительными признаками (например, наличие запаха и звука). «Интенсивность» этих признаков может быть различной в разных клетках среды. Соответственно пространственным положениям клеток окрестности автомата в М-сети выделены две группы по девять *i*-моделей, содержательно интерпретируемых как признаки клеток среды. Восприятию признака из окрестности М-автомата соответствует возбуждение определенной *i*-модели, причем «интенсивность» признака отражена величиной возбужденности этой *i*-модели.

*i*-Модели объектов и признаков среды, а также алгоритм, реализующий функцию их восприятия из окрестности автомата, составляют *блок восприятия* М-автомата.

При опознании человеком воспринятого объекта последний относится им к определенному классу, причем в зависимости от признаков один и тот же объект может быть отнесен к разным классам. Наличие в системе понятий человека абстракций различного уровня свидетельствует о том, что существует и соответствующая иерархия внутренних (корковых) информационных моделей, т. е. классы объектов естественной среды объединяются в классы классов и т. д. Отнесение объекта к тому или иному классу и обусловливает реакцию человека на данный объект.

В самообучающемся и самоорганизующемся М-автомате *i*-модели высших уровней иерархии образуются вследствие процессов самоорганизации; их семантика определяется наличием связей с теми или иными *i*-моделями первого уровня, семантика которых предполагается известной. Однако, поскольку здесь процесс самоорганизации не рассматривается, то существование в *логической сфере* автомата некоторого множества *i*-моделей, совокупность связей между которыми задана, постулируется. Сведения о взаимосвязи различных понятий, используемых человеком, позволяют организовать множество *i*-моделей логической сферы в определенного вида многоуровневую структуру.

Элементы блока восприятия, составляющие первый уровень логической сферы, объединяются по различным признакам (пространственная близость, понятийное обобщение и т. п.) в классы, представленные *i*-моделями второго уровня. Устанавливаемые при этом связи от *i*-моделей первого к *i*-моделям второго уровня логической сферы отражают родо-видовую взаимосвязь соответствующих этим *i*-моделям понятий. Естественно, что по различным признакам одни и те же *i*-модели первого уровня могут быть включены в различные классы, т. е. одна и та же *i*-модель первого уровня

может иметь связи с несколькими *i*-моделями второго уровня. Аналогично *i*-модели второго уровня объединяются в классы, представленные *i*-моделями третьего уровня, и т. д. Класс высшего уровня может включать в себя не только элементы предыдущего уровня, но также — частично — и элементы более низких уровней. Так, например, к *i*-моделям третьего уровня могут подходить связи, направленные от *i*-моделей и второго и первого уровней. Это позволяет в ряде случаев более полно отразить родо-видовую взаимосвязь объектов и понятий, соответствующих *i*-моделям сети.

Кроме родо-видовых связей, между различными *i*-моделями логической сферы установлены также связи, отражающие ассоциативные отношения, существующие между используемыми понятиями в системе понятий человека. «Ассоциативные» связи могут устанавливаться между *i*-моделями как одного, так и различных уровней. Количество уровней иерархии и общее количество связей в М-сети автомата может быть сколь угодно велико и ограничивается в основном возможностями практической реализации автомата.

Классификация и оценка воспринятой человеком ситуации, а также реакция на эту ситуацию часто определяются не только наличием каких-либо определенных объектов, но и их отсутствием. Этот факт воспроизведен в сети РЭМа введением *i*-моделей «отсутствие *i*-го объекта», возбуждение которых существенным образом влияет на поведение автомата.

Благодаря наличию связей между *i*-моделями логической сферы возбуждение от *i*-моделей воспринятых объектов и признаков распространяется по сети. Образующееся распределение возбуждений в сети интерпретируется как логическая оценка М-автоматом воспринятой ситуации.

**Сфера эмоций.** Воспринятая М-автоматом информация подвергается не только «логической», но и «эмоциональной» оценке. В структуре автомата выделена эмоциональная сфера, включающая множество *i*-моделей эмоций. Последнее соответствует множеству корковых *i*-моделей эмоций, возбуждающихся (предположительно) в коре головного мозга человека при осуществлении поведенческих актов в условиях, близких к тем, в которые поставлен автомат. Связи между *i*-моделями эмоциональной сферы отражают взаимоотношение соответствующих эмоций у человека. Так, например, если в М-сети автомата имеются *i*-модели эмоций «страх» и «радость», то, очевидно, между ними должны быть установлены взаимотормозящие связи.

Все многообразие испытываемых человеком эмоций может быть условно разбито на два класса — эмоции положительные и отрицательные. В соответствии с этим в эмоциональную сферу автомата введены *i*-модели «приятно» (Пр)

и «неприятно» (НПр), связанные с остальными *i*-моделями эмоциональной сферы таким образом, что возбуждение *i*-моделей Пр и НПр в каждый момент времени отражает обобщенное «эмоциональное» состояние автомата. Между *i*-моделями Пр и НПр установлены взаимотормозящие связи. Соотношение возбуждений Пр и НПр используется для общей, интегральной оценки состояния автомата.

*i*-Модели эмоциональной сферы связываются с определенными *i*-моделями логической сферы. Связи от элементов логической сферы к элементам эмоциональной обеспечивают возможность «эмоционально» оценивать воспринятую ситуацию. Однако, как известно из психологии, существует и обратная связь — влияние состояния эмоциональной сферы на восприятие и переработку информации. Этот факт в М-автомате отражается установлением связей от *i*-моделей эмоциональной сферы к *i*-моделям логической. Наличие того или иного распределения возбуждений в эмоциональной сфере автомата может существенно влиять на распределение возбуждений в логической сфере и, следовательно, на поведение автомата. Можно говорить, что взаимосвязь логической и эмоциональной сфер обеспечивает «субъективность» восприятия и переработки информации автоматом.

Влияние эмоциональной сферы на двигательные реакции автомата осуществляется двумя путями: через логическую и через некоторую промежуточную сферу, включающую *i*-модели «желаний», которые можно рассматривать как «побуждения к действиям». Согласно исходной гипотезе каждому элементу эмоциональной сферы может быть поставлено в соответствие желание, которое определяет характер предполагаемого действия. В структуре М-автомата связи от *i*-моделей эмоций к *i*-моделям желаний и от последних — к действиям устанавливаются в соответствии с содержательной интерпретацией соединяемых *i*-моделей.

**Двигательная сфера.** Как уже говорилось, автомат может совершать действия-шаги, переводящие его из одной клетки среды в другую, соседнюю. Такие шаги будем называть *простыми действиями*. Пусть в результате ряда простых действий автомат перешел из клетки $g_k$ в клетку $g_n$, не принадлежащую окрестности $g_k$. В этом случае можно сказать, что автомат совершил действие, переводящее его из клетки $g_k$ в клетку $g_n$. Такое действие, состоящее из ряда простых, будем называть *сложным*. Последовательность сложных действий также можно рассматривать как одно действие — движение в общем направлении. Такое действие назовем *составным*.

Подобное представление о действиях автомата позволило построить его двигательную сферу в виде иерархической структуры, содержащей множество *i*-моделей действий. Пер-

вый уровень двигательной сферы составляют простые действия, второй — сложные и третий — составные.

Составные, сложные и простые действия имеют различную степень общности. Более общее действие может состоять из ряда менее общих. Это отношение зафиксировано в автомате наличием связей между $i$-моделями действий разных уровней.

**Взаимодействие сфер М-сети автомата.** По связям, установленным между $i$-моделями логической сферы и $i$-моделями «желаний», возбуждение в М-сети, вызванное восприятием определенной ситуации, распространяется на двигательную сферу. При этом различным уровням обобщения воспринятой информации соответствуют различные по степени обобщения действия. Связи между первыми (нижними) уровнями логической и двигательной сфер обеспечивают наиболее прямую передачу возбуждения и, следовательно, наиболее быструю ответную реакцию автомата. Связи устанавливаются таким образом, что $i$-модель каждого объекта внешней среды оказывается связанной с $i$-моделью того действия, выполнение которого наиболее целесообразно при восприятии данного объекта. Эти связи можно сопоставить с безусловнорефлекторными, поскольку они определяют ответ автомата на основе только воспринятой информации, без учета «индивидуального» прошлого опыта. Наличие и характер прошлого опыта автомата отражаются связями между высшими уровнями логической и двигательной сфер. Эти связи можно сопоставить с условнорефлекторными. Тогда каждая реакция автомата может быть представлена как взаимодействие цепочек условных и безусловных рефлексов.

Принцип взаимосвязи $i$-моделей различных сфер показан на рис. 12. Пусть $r_i^j$ — $i$-модель некоторого воспринятого объекта внешней среды $a_i^j$. «Безусловнорефлекторно» $r_i^j$ связана с $i$-моделями первого уровня двигательной сферы $d_1$, $d_2$, $d_3$. Пусть восприятие $a_i^j$ вызывает возбуждение элемента $e_k$ эмоциональной сферы, которому соответствует желание $j_m$. В свою очередь, возбуждение $j_m$ свидетельствует

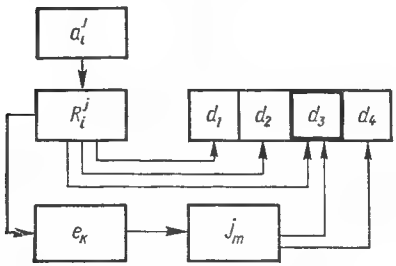



Рис. 12. Пример взаимосвязи $i$-моделей различных сфер М-сети.

о «желании» автомата выполнять действие $d_3$ или $d_4$. Как видно из схемы, действие $d_3$ наиболее полно соответствует как воспринятому объекту, так и возникшему «желанию» и, следовательно, в данном случае является наиболее целесообразным для автомата.

Взаимосвязь $i$-моделей, принадлежащих различным сферам М-сети автомата, является существенно важной для реализации ряда программ переработки информации, участвующих в организации целесообразного поведения. Выбранная структура автомата отражает представления исходной гипотезы относительно способов реализации таких программ, как взаимодействие эмоциональной и логической программ переработки информации, иерархичности этой переработки, иерархичности двигательных программ и связи действий различного уровня с «эмоциями» и «логикой». Поэтому можно полагать, что экспериментальное исследование автомата позволит оценить эффективность использования сделанных в гипотезе предположений при создании устройств, способных к организации разумного поведения.

## § 3. *Динамика М-автомата*

Пусть в некоторый момент $t$ М-автомат находится в клетке среды $g_i$. Объекты, находящиеся в окрестности $g_i$, воспринимаются автоматом, т. е. возбуждаются соответствующие $i$-модели в структуре первого уровня логической сферы. В момент $t + 1$ распределение возбуждений в М-сети автомата определяется состоянием сети в момент $t$, характеристиками $i$-моделей и законом распространения возбуждений в сети.

Конкретный вид формулы пересчета для М-сети РЭМа будет приведен несколько позже — при описании программной реализации автомата. Тогда же будет обсужден и конкретный вид выбранных характеристик $i$-моделей сети. Сейчас отметим только, что задание характеристик производилось в основном эвристически, с учетом некоторых нейропсихологических аналогий и предположений относительно качественных различий между характеристиками элементов, относящихся к различным сферам и уровням.

Одним из наиболее существенных отличий М-автоматов от разработанных до настоящего времени моделей с сетевой нейроноподобной структурой является наличие механизма СУТ. Однако, поскольку РЭМ был первым из действующих М-автоматов, было решено представить в нем функции СУТ в несколько упрощенном виде. Вначале мы ограничились одноуровневой СУТ. Кроме того, не были реализованы функции торможения и зависимость величины дополнительного

возбуждения выделяемых СУТ *i*-моделей от интегральной оценки состояния эмоциональной сферы М-сети.

В каждый момент времени СУТ РЭМа выбирает одну или несколько наиболее возбужденных *i*-моделей сети. Эти *i*-модели получают дополнительное возбуждение, равномерно распределяемое на все элементы выделенной группы. Одновременно для всех выделенных СУТ *i*-моделей характеристика затухания изменяется таким образом, чтобы обеспечить последующее быстрое снижение их возбуждения. «Нормальное» затухание возбуждения *i*-моделей восстанавливается только тогда, когда они оказываются вне выделенной СУТ группы. При повторных выделениях СУТ одной и той же *i*-модели (в последовательные моменты времени) дополнительное возбуждение этой *i*-модели не производится.

Если в некоторый момент времени в группу *i*-моделей, выделяемых СУТ, входит *i*-модель первого уровня двигательной сферы, то считается, что автоматом принято «осознанное» решение осуществить определенное действие. При этом специальный алгоритм переводит М-автомат, в соответствии с выбранным действием, в одну из клеток окрестности.

Если в группу *i*-моделей, выделенных СУТ, входит несколько *i*-моделей действий первого уровня, то выполняется действие, *i*-модель которого имеет наибольшую возбужденность. Автомат может выполнить действие и в том случае, если ни одно из простых действий не выделено СУТ, но возбуждение какой-либо *i*-модели первого уровня двигательной сферы превышает определенную, заранее установленную величину. В этом случае можно говорить, что выполняется «автоматический», «неосознаваемый» шаг.

Действие, планируемое или выполняемое автоматом в определенной ситуации, будем называть его внешней реакцией на данную ситуацию. Последовательность таких реакций составляет план или двигательное поведение автомата соответственно.

Возбуждения *i*-моделей М-сети автомата будем называть его внутренней реакцией. При рассмотрении психологических аналогий и интерпретаций протекающих в М-сети процессов мы уже обсуждали возможность использования таких терминов, как внимание, осознание, подсознание, мышление и т. п., применительно к М-автоматам. Поэтому в дальнейшем, при описании работы автомата РЭМ, будем пользоваться этой терминологией и, в частности, различать «осознанные» и «неосознанные» внутренние реакции автомата. Последовательность «осознанных» внутренних реакций, т. е. понятий, соответствующих выделяемым СУТ *i*-моделям, будем называть «ходом мышления» автомата. Можно полагать, что анализ «мышления», наряду с анализом плана и двига-

тельного поведения автомата, позволит судить о разумности его действий.

Передвигаясь в среде, РЭМ осуществляет определенный план; и его «ход мышления» должен адекватно (с точки зрения человека) пояснять каждое конкретное действие. В принципе, поведение РЭМа должно быть целесообразным и при отсутствии плана поведения, поскольку в каждой ситуации автомат способен выбирать и выполнять действие, наиболее соответствующее его внутреннему состоянию. Кроме того, поскольку информация о новых воздействиях среды поступает всегда в уже возбужденную М-сеть, происходит учет прошлых воздействий, определивших такое состояние сети. В результате последовательные действия РЭМа оказываются взаимосвязанными и взаимообусловленными.

Однако нашей задачей, как уже отмечалось в начале настоящего раздела, являлась не только демонстрация возможности организации целесообразного поведения М-автоматами, но и создание такого автомата, который можно было бы рассматривать в качестве модели робота, способного выполнять определенные направленные действия. Именно поэтому мы сочли необходимым включить в автомат блок планирования. Общая ориентация автомата на формирование именно двигательного поведения, а также то обстоятельство, что вся необходимая для процесса планирования информация подготавливается М-сетью, обусловили некоторую специфику организации этого блока.

Прежде всего, напомним, что при разработке РЭМа было решено отказаться от реализации процесса планирования в М-сети и представить блок планирования в виде соответствующего алгоритмического описания. В связи с этим нам пришлось обратиться к существующим в литературе по психологии описаниям процесса планирования и провести некоторые дополнительные исследования. Обсуждение общих теоретических положений и проведенного нами экспериментального исследования построения планов двигательного поведения человека мы и предпошлем более подробному описанию блока планирования разработанного нами М-автомата.

## § 4. *Планирование поведения*

**Построение планов двигательного поведения человеком.** Двигательному поведению человека, как правило, предшествует акт планирования определенных действий на более или менее длительный промежуток времени. Планирование может производиться на различных уровнях — от выбора общей цели и приближенного анализа пути ее достижения до выбора конкретных действий в определенных ситуациях. При этом

фиксация общей цели оказывает существенное влияние на выработку планов более низких уровней.

«План — это всякий иерархически построенный процесс в организме, способный контролировать порядок, в котором должна совершаться какая-либо последовательность операции» [38].

Для выявления правил и приемов, применяемых человеком в процессе планирования, были изучены литературные данные по этому вопросу, а также проведено экспериментальное исследование деятельности человека-испытуемого по построению планов поведения в некоторой условной среде. Основная задача эксперимента состояла в том, чтобы установить специфические особенности изучаемой деятельности в тех конкретных условиях, в которых предстоит действовать конструируемому М-автомату РЭМ. Иначе говоря, необходимо было «привязать» сформулированные в общем виде литературные данные относительно процесса планирования к особенностям определенного ранее «сюжета» моделирования. Поэтому мы стремились построить психологический эксперимент как модель упомянутого сюжета, т. е. поставить человека-испытуемого примерно в те же условия, в которых должен действовать РЭМ. Одна из целей психологического эксперимента состояла, кроме того, в получении материала, пригодного для последующей оценки адекватности работы блока планирования, т. е. для сравнения планов поведения РЭМа с планами поведения человека в аналогичных условиях.

Методика эксперимента была построена таким образом, чтобы обеспечить наблюдение и фиксацию основных особенностей протекания взаимосвязанных процессов формирования планов испытуемыми в выбранной условной среде.

Предварительно, в специальном эксперименте исследовались индивидуальные особенности памяти испытуемых, связанные со скоростью запоминания зрительного материала. Для этого каждому испытуемому предъявлялся следующий тест. На листе бумаги в случайном порядке были написаны буквы русского алфавита. Перед испытуемым ставилась задача — в кратчайшее время прочесть буквы в алфавитном порядке. Время, затрачиваемое испытуемым на прочтение алфавита, измерялось. Эксперимент повторялся до тех пор, пока время воспроизведения не стабилизировалось. На основании анализа кривой запоминания делался вывод о необходимом времени предъявления материала в основном эксперименте для данного испытуемого. При этом применялось следующее эмпирическое правило: время предъявления принималось равным разности между стабилизировавшимся временем воспроизведения алфавита по тесту и временем, затрачиваемым испытуемым без теста.

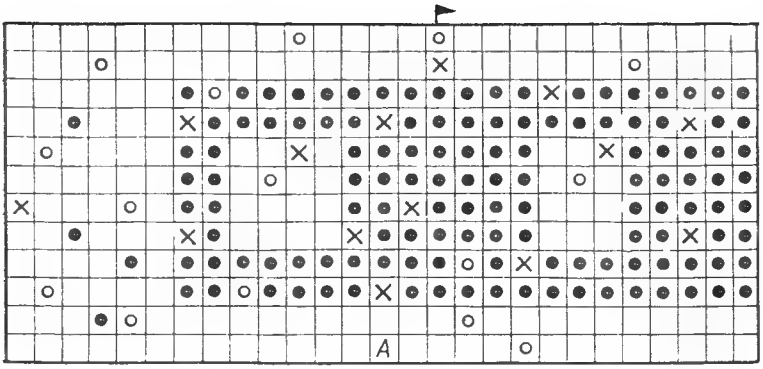



Рис. 13. Схема среды, предъявляемая испытуемым:

○ — красные клетки; ● — зеленые; × — синие.

Эксперимент по построению планов двигательного поведения был проведен с 20 испытуемыми.

Перед испытуемыми ставилась следующая задача: на предъявляемой условной схеме местности (среде) выбрать путь от исходной точки к целевой. Исходная и целевая точки задавались экспериментатором и отмечались на схеме местности специальным образом. Схема местности представляла собой разделенную на клетки плоскость. Каждая клетка была окрашена в один из четырех цветов — белый, зеленый, красный или синий (рис. 13). Испытуемому сообщалось, что при выборе пути он должен исходить из следующих соображений: чем большее количество красных клеток пересекает маршрут и чем ближе он к этим клеткам, тем лучше выбранный путь; чем большее количество синих клеток пересекает маршрут и чем ближе он к этим клеткам, тем хуже выбранный путь; белые клетки нейтральны; зеленые клетки «немного хуже» белых; выбираемый путь должен быть по возможности коротким. С учетом этих условий испытуемому предлагалось выбрать оптимальный (с его точки зрения) план передвижения в среде.

Эксперимент проводился в следующем порядке.

1. Испытуемому объяснялась задача эксперимента и условия. Проводилось предварительное ознакомление с местностью. При этом показываемая испытуемому местность отличалась от той, на которой проводился основной эксперимент, расположением окрашенных клеток и их количеством.

2. На время $t$, которое выбиралось индивидуально в зависимости от результатов предварительного эксперимента с испытуемым, ему предъявлялась местность с обозначенными исходной и целевой клетками.

3. Испытуемому предлагалось воспроизвести на чистом листе бумаги все, что он запомнил на местности за время предъявления. (Предварительно давалась установка на выбор маршрута, а не на запоминание местности.)

4. Испытуемому предлагалось уточнить маршрут и повторно на время $t$ предъявлялась местность.

5. Испытуемому предлагалось нарисовать выбранный путь (или пути).

6. Повторение п. 4.

7. Повторение п. 5.

8. Повторение п. 4.

9. Повторение п. 3.

10. Изменялась поставленная задача. Испытуемому предлагалось на верхней границе местности самостоятельно выбрать целевую клетку и построить план ее достижения с учетом предыдущих условий. Предъявлялась местность.

11. Предлагалось нарисовать выбранный путь (или пути).

Все действия испытуемые сопровождали словесным отчетом. Последний этап эксперимента состоял в анализе и оценке испытуемым построенных им планов поведения. Проводилась также имитация изменения условий выбора маршрута передвижения. Испытуемому предлагалось выбрать путь «при наличии большого количества времени на передвижение», «при ограниченном времени», «при дефиците времени». Выбранные маршруты и их варианты фиксировались. В качестве примера ниже приведен протокол эксперимента с испытуемым Г.

**Протокол эксперимента по построению плана двигательного поведения**

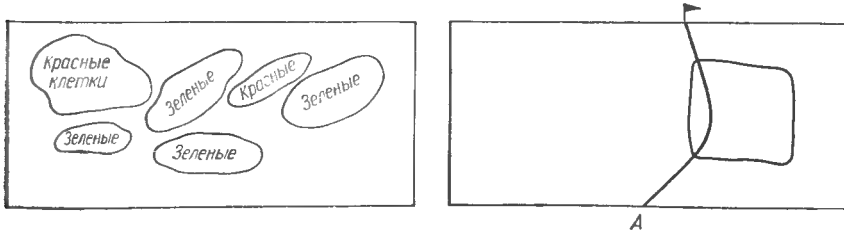
Испытуемый Г., 27 лет.

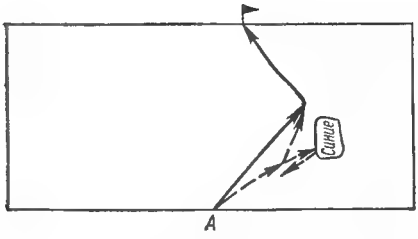
1. Минимальное время прочтения алфавита по тесту — 17 *сек.* Время прочтения алфавита без теста — 14 *сек.* Время предъявления основного материала выбрано равным 3 *сек.*

2. Воспроизведение запомненного расположения клеток на местности.

Рис. 14. Схематическое воспроизведение среды испытуемым (первое предъявление).

Рис. 15. План передвижения, выбранный испытуемым (второе предъявление среды).





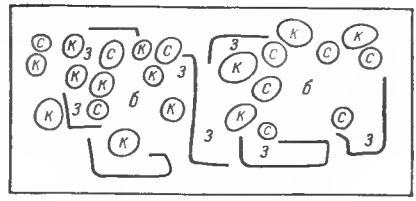



Рис. 16. План передвижения, выбранный испытуемым (третье предъявление среды).

Рис. 17. Схематическое воспроизведение среды испытуемым (четвертое предъявление).

Рисует местность (рис. 14). «Хорошо запомнил область красных клеток. Синие помню плохо. Зеленые образуют поля, охватывающие красные клетки».

3. Выбор плана передвижения.

Рисует план (рис. 15). «Видел квадраты белого поля. Зеленое тоже образует квадраты. Где-то в центре есть синее поле. Не помню точно, где какие клетки, но если путь проведу так, то, по-моему, пройду через зеленое, белое и красное. Сколько будет красных — не знаю, но должен пройти или через них или совсем рядом. Путь, конечно, должен идти вправо. Вообще, вся правая часть мне кажется как-то лучше, больше привлекает внимание».

4. Выбор плана передвижения.

Рисует план (рис. 16). «Теперь я смотрел только на правую часть. Вначале пошел вправо до красной клетки и от нее — дальше по прямой Но там синие. Вернулся в красную клетку и пошел опять вправо, обходя синюю снизу, но так будет очень далеко. Нужно обходить сверху. Опять вернулся в красную и пошел вверх на белую поляну с красной клеткой, а оттуда прямо на цель. Еще раз просмотрел весь путь и решил «срезать» его немного. В самую нижнюю красную клетку заходить не буду. Так, пожалуй, лучше».

Пунктиром показаны просмотренные варианты, сплошной линией — окончательно выбранный план передвижения.

5. Воспроизведение расположения клеток на местности.

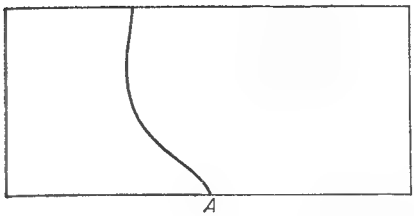
Рисует местность (рис. 17). «Теперь я постарался запомнить и левую часть, но все-таки правая мне как-то больше нравится. Четко выделяются зоны, явно плохие для маршрута. Например, в центре. Правда, слева много красных клеток и белого, но они очень далеко. А вот справа внизу очень хорошая область. Там и красных достаточно, и к цели по ним быстро пройти можно. И выше, там. где белая поляна, тоже хорошая область».

6. Выбор плана передвижения к произвольной клетке на верхней границе местности.

Рисует план (рис. 18). «Теперь, конечно, можно пойти по-другому Можно было бы вообще обойти зеленое и по красным выйти наверх, но так очень далеко. Наверное, будет лучше идти через левую белую поляну».

7. Имитация изменения условий выбора плана передвижения.

«Если у меня много времени, то я пойду, пожалуй, влево. Там есть несколько красных. Зайду в белую поляну. Из нее — вверх, а там по красным клеткам дойду до цели. Если времени достаточно, но не слишком много, пойду так, как шел раньше — вправо через



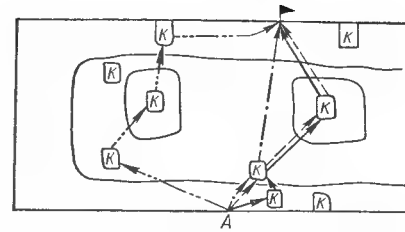




Рис. 18. План передвижения к произвольной клетке.

Рис. 19. Планы передвижения, выбранные испытуемым при изменении условий планирования:
—··—, — — избыток времени; —·— —дефицит времени; — — — — нейтральные условия.

правую белую поляну. Ну, а если совсем мало времени, тогда даже не стану заходить на поляну, обойду только справа синий массив и — прямо к цели».

Выбранные испытуемым планы передвижения показаны на рис. 19.

В результате анализа словесных отчетов испытуемых были сделаны некоторые предположения о содержании и последовательности этапов построения человеком планов двигательного поведения. Одним из основных нам кажется предположение о формировании особого рода «внутренней модели», представляющей собой некоторый набор оценок участков среды, производимых в соответствии с особенностями среды и конечной целью планирования. Испытуемые, как правило, выделяли в предъявляемой им схеме местности «хорошие» и «плохие» участки. Характер оценки тех или иных участков обусловливался двумя причинами — наличием определенным образом окрашенных клеток (здесь было замечено разделение испытуемых на две группы: одни производили оценку в основном по синим клеткам, другие — по красным) и близостью клеток к кратчайшему пути — от исходной клетки к целевой.

На основе таких оценок участков среды производился выбор планов передвижения, их сравнение и окончательный выбор одного из них (варианта). Необходимо отметить, что различные испытуемые по-разному оценивали одни и те же участки среды. Так, например, испытуемый Г. при проведении анализа выбранных им планов отметил, что ему «с самого начала вся правая часть казалась лучше; она как-то приятнее, может быть даже гармоничнее». В то же время испытуемый Т. считал, что «левая часть гораздо интереснее, она больше привлекает внимание». Ряд испытуемых, первоначально фиксировавших внимание на одной из частей схемы местности (обычно, это была левая часть), в после-

дующем изменяли свои оценки (испытуемый М.: «Сначала я строил обход синего поля слева, но теперь мне кажется, что путь справа будет лучше. Здесь достаточно много красного, от синих можно пройти далеко, и путь, по-моему, будет короче»).

Таким образом, можно предположить, что произведенная оценка среды корректируется при получении дополнительной информации (повторных предъявлениях схемы среды) или изменении цели планирования (например, в условиях описанного эксперимента — при изменении целевой клетки). Различия в оценках среды можно, по-видимому, объяснить различным прошлым опытом и индивидуальными особенностями личности испытуемых.

При проведении экспериментального исследования были замечены следующие характерные особенности процесса планирования.

1. Производилась субъективная оценка среды, основанная на определенных интерпретациях ее элементов (например, синие — опасность).

2. Строилась иерархия планов. Выбор общего направления движения влиял на выбор конкретных этапов плана.

3. Просматривалось два-три варианта плана, проводилась их сравнительная оценка и на ее основе выбирался окончательный план поведения.

4. Запоминались в качестве ориентиров определенные элементы (клетки) среды, расположенные на каждом этапе выбранного плана.

Выявлено два механизма влияния высшего уровня плана двигательного поведения на выбор конкретных этапов плана. Первый механизм — влияние общего направления движения — обусловливает концентрацию внимания испытуемого на тех участках местности, которые расположены в «зоне главного направления». Второй механизм связан с коррекцией направления общего движения на каждом выбираемом этапе плана.

Сделанные в результате анализа экспериментов предположения, а также сведения о процессе планирования, имеющиеся в литературе, были положены в основу алгоритма блока планирования М-автомата РЭМ.

**Описание блока планирования поведения.** Особенности построения человеком планов двигательного поведения, замеченные при экспериментальном исследовании этого процесса, позволили построить модель, поведение которой в определенном отношении близко к поведению человека. Модель представляет собой неполный М-автомат и является одним из блоков автомата РЭМ, воспроизводящего процессы переработки информации, связанные с формированием двигательного поведения.

Поскольку планирование поведения обусловлено наличием определенной информации о среде, в модели предусмотрен осмотр участков среды, бо́льших, чем окрестность автомата. В отличие от «ситуативного» осмотра среды в пределах окрестности автомата будем называть этот осмотр «стратегическим».

Стратегический осмотр заключается в последовательном восприятии содержимого клеток определенного участка среды и является первым этапом построения «внутренней модели» этого участка.

Цель движения автомата задается экспериментатором в виде координат клетки среды, которую в дальнейшем будем называть просто целью. Находясь в одной из клеток, автомат определяет направление движения на цель и, в соответствии с этим, производит выбор участка среды, необходимого для стратегического осмотра. Предполагается, что автомат всегда осматривает участок одного размера («поле зрения» автомата) и располагает его «впереди» себя; кроме того, количество возможных поворотов автомата ограничено четырьмя (в принятой системе координат — вниз, вправо, вверх, влево). Выбор конкретного расположения участка определяется взаимным расположением в среде автомата и цели.

**Представление внутренней модели среды.** Ограничение, связанное с фиксацией размеров осматриваемого участка среды, не является принципиальным. В то же время такое допущение позволяет считать, что в структуре автомата сформирована внутренняя модель соответствующего участка пространства среды. Исходя из этого предположения, мы задаем иерархию внутренних моделей среды, соответствующих различным уровням пространственных обобщений (рис. 20). Первый, низший, уровень внутренней модели состоит из совокупности *i*-моделей отдельных клеток среды, причем семантика каждой *i*-модели отражает здесь пространственное положение клетки в среде. Необходимо отметить, что *i*-моделям клеток не соответствуют какие-либо конкретные объекты. Совокупность этих *i*-моделей является лишь «представлением автомата о пространстве». Определенное содержание может быть внесено в них только после осмотра среды (этот процесс будет описан ниже).

*i*-Модели первого уровня по пространственному признаку объединяются в группы, каждая из которых представляется одной *i*-моделью второго уровня. Упорядоченная совокупность *i*-моделей второго уровня образует второй уровень модели среды. Аналогично могут быть образованы и более высокие уровни. Между *i*-моделями различных уровней устанавливаются связи, направленные от *i*-моделей низших к *i*-моделям высших уровней. *i*-Модели внутренней мо-

дели среды различных уровней будем называть в дальнейшем просто клетками модели среды соответствующих уровней.

В процессе планирования М-автомат не производит каких-либо «реальных» действий. Информация о среде фиксируется во внутренней модели среды при стратегическом осмотре, и в последующем все действия автомат производит «мысленно», используя различные уровни внутренней модели. Последние выбраны в М-автомате так, что простое действие переводит автомат из одной клетки первого уровня модели среды в другую; сложное действие переводит автомат в соседнюю клетку второго уровня модели среды; составное — в соседнюю клетку третьего уровня. Количество клеток различных уровней выбрано таким образом, что на осматриваемом участке среды план верхнего уровня представляет собой одно составное действие, выбираемое автоматом в зависимости от расположения цели и наличия в клетках среды тех или иных объектов. Нижний уровень плана составляет последовательность сложных действий. В процессе планирования двигательного поведения человек, как правило, не производит предварительного выбора конкретных элементарных действий, а ограничивается достаточно общими представлениями о направлении (или последовательности направлений) движения. Это обстоятельство позволяет нам не воспроизводить в автомате планирования простых действий.

*Фиксация оценок объектов среды во внутренней модели.* Остановимся более подробно на процессах оценки автоматом осматриваемого участка среды и построения плана передви-

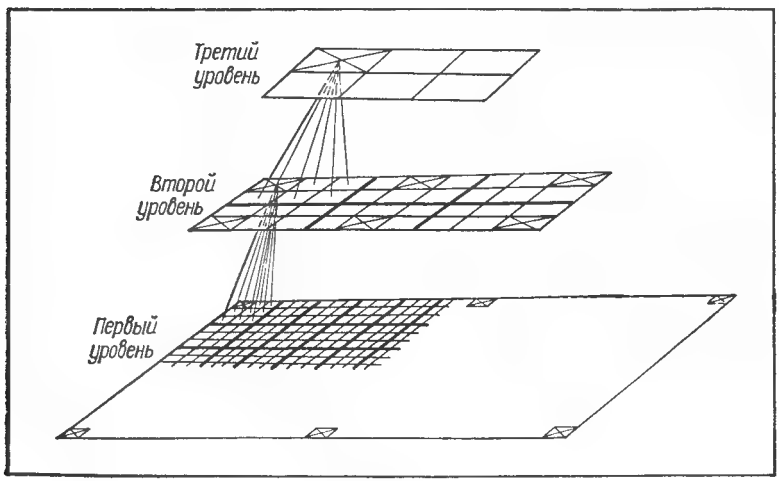



Рис. 20. Структура внутренней модели среды.

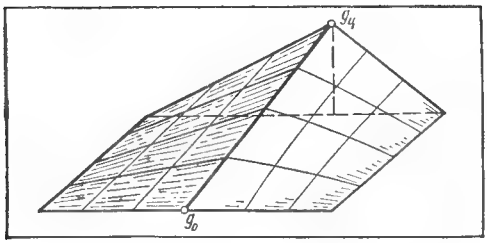



Рис. 21. Начальная P-поверхность ($g_o$ — место расположения автомата, $g_ц$ — подцель).

жения. Предусмотрены два режима построения плана: планирование промежуточного участка движения и окончание плана. В первом случае цель расположена вне осматриваемого участка среды и автомат на границе участка выбирает подцель — клетку, к которой планируется передвижение. В процессе планирования подцель может быть изменена. Во втором случае цель располагается внутри осматриваемого участка и на процесс планирования накладываются более жесткие ограничения — план должен быть окончен в заданной экспериментатором клетке «цель». Поскольку первый случай является более общим, будем рассматривать процесс планирования, полагая, что цель задана вне осматриваемого участка. При этом вначале выбираются подцели — клетки, находящиеся на пересечении одной из границ участка и прямой, соединяющей собственную клетку автомата и цель.

Оценка участка среды начинается с оценки пространственного расположения ячеек участка по отношению к подцели и минимальному пути к ней. Клетка модели среды первого уровня, в которой расположена подцель, получает максимальную оценку; остальные клетки оцениваются в зависимости от их близости к подцели и прямой, соединяющей подцель с собственной клеткой автомата (т. е. в зависимости от близости к минимальному пути). Оценка собственной клетки автомата равна нулю. В результате операций по пространственной оценке среды на первом уровне модели среды образуется некоторая оценочная поверхность (*P*-поверхность), которую в дальнейшем будем называть начальной. Примерный вид начальной *P*-поверхности показан на рис. 21.

Дальнейшая оценка среды связана уже с учетом содержания в среде тех или иных объектов и зависит от «отношения» автомата к этим объектам. Клетки участка среды осматриваются автоматом поочередно, в фиксированном порядке. Стратегический осмотр производится при участии всех блоков РЭМа, и оценка содержимого каждой клетки среды определяется общим состоянием М-сети автомата в

момент осмотра. В качестве инструмента оценки используется разность возбуждений $i$-моделей Пр и НПр эмоциональной сферы автомата. Результат оценки алгебраически суммируется с пространственной оценкой осматриваемой клетки, образуя на начальной $P$-поверхности «пик» или «впадину» в зависимости от типа воспринятого объекта. Такой процесс можно назвать первичной оценкой, поскольку на этой стадии учитывается содержание только осматриваемой клетки.

Вторичная оценка заключается в распространении представления о «приятном» или «неприятном» на несколько концентрических слоев вокруг той клетки, которая содержит какой-либо объект. Это распространение осуществляется по зависимости

$$P = P_0 + k\frac{P'}{n}, \tag{6.1}$$

где $P$ — оценка клетки, $n$ — номер слоя соседних клеток, $P_0$ — оценка пространственного расположения клетки, $P'$ — оценка объекта, $k$ — коэффициент пропорциональности.

В результате повышается оценка клеток, расположенных близко к «приятным» объектам, и понижается оценка клеток, расположенных близко к «неприятным» объектам. Образующуюся в итоге на первом уровне модели среды оценочную поверхность, учитывающую как пространственное расположение, так и конкретное содержание клеток среды, будем называть конечной $P$-поверхностью. Наличие иерархической организации внутренней модели среды позволяет автомату формировать обобщенные представления о среде в виде конечных $P$-поверхностей второго и третьего уровней. Формирование таких $P$-поверхностей производится следующим образом. Выше мы говорили, что первый уровень внутренней модели представлен совокупностью $i$-моделей отдельных клеток среды. Результатом построения конечной $P$-поверхности первого уровня является определение возбужденности каждой из этих $i$-моделей. По связям, установленным от $i$-моделей первого уровня внутренней модели среды, возбуждение распространяется на второй и третий уровни. Образующиеся в результате этого процесса распределения возбуждений на $i$-моделях второго и третьего уровней внутренней модели среды и составляют $P$-поверхности соответствующих уровней.

Сформированные конечные $P$-поверхности используются в дальнейшем для построения плана передвижения в среде. По $P$-поверхности третьего уровня производится выбор клетки третьего уровня с максимальной оценкой, и составное действие, соответствующее направлению на нее, становится высшим уровнем плана. Выбор определенного составного

действия оказывает влияние на выбор элементов плана низшего уровня (последовательности сложных действий) путем повышения возбуждения $i$-моделей соответствующих действий. (Например, при составном действии «вверх» будут повышены возбуждения $i$-модели сложного действия «вверх» и, несколько меньше, $i$-моделей «влево вверх» и «вправо вверх».)

*Построение плана по внутренней модели среды.* Построение плана действий низшего уровня связано с использованием конечной $P$-поверхности, сформированной на втором уровне модели среды. Пусть автомат строит план начиная с некоторой клетки $g_0$ второго уровня модели среды. Перебирая возможные сложные действия, автомат придает их $i$-моделям возбуждения, равные оценкам тех клеток (по $P$-поверхности), в которые соответствующие действия могут автомат перевести. Кроме того, некоторые $i$-модели действий получают дополнительное возбуждение от $i$-модели выбранного составного действия. Дополнительное возбуждение получают также $i$-модели сложных действий, наиболее соответствующих на данном этапе направлению на подцель. Сложное действие, $i$-модель которого имеет максимальное возбуждение, принимается в качестве первого элемента плана низшего уровня. Автомат «мысленно» осуществляет выбранное действие, перемещается в соответствующую ему клетку $g_k$ второго уровня внутренней модели среды; процесс повторяется до тех пор, пока автомат не достигает клетки второго уровня, содержащей подцель. Последовательность выбираемых сложных действий запоминается.

*Выбор варианта плана.* В процессе выбора очередного этапа плана возможна ситуация, при которой несколько $i$-моделей действий имеют одинаковые или достаточно близкие возбуждения. Произвольный выбор одного из них может привести к построению неудовлетворительного плана, поскольку в конечном результате различные варианты могут оказаться неравноценными для автомата. С другой стороны, перебор и оценка всех возможных вариантов не характерны для человека, процессы планирования которого автоматом моделируются. Человек, как правило, просматривает только несколько вариантов и производит выбор лучшего из них, пользуясь некоторым субъективным «критерием оптимальности».

Аналогичный выбор варианта был предусмотрен и в описываемом М-автомате. В качестве «показателя ценности» построенного плана выбрана условная величина

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{m} P_i}{m}, \qquad (6.2)$$

где $m$ — количество этапов плана, $P_i$ — оценка $i$-й клетки второго уровня внутренней модели среды, через которую проходит план.

Оценка плана производится автоматом на основании сравнения «показателя ценности» с заранее заданной величиной $N_1$, отражающей «прошлый опыт» автомата и являющейся «критерием ценности» плана. Если показатель ценности ниже критерия, то рассматривается следующий вариант плана. Этот процесс происходит до тех пор, пока не будет выполнено условие $N \geqslant N_1$. Если же все варианты плана оцениваются ниже критерия или количество вариантов превышает возможность рассмотрения их автоматом, то происходит сравнение показателей ценности построенных вариантов и выбирается лучший из них. Тот факт, что оценка ни одного из вариантов не превысила критерий, выражается в увеличении возбужденности $i$-модели «неприятно» в эмоциональной сфере автомата. В дальнейшем это оказывает существенное влияние на выполнение выбранного плана. Если же в процессе выбора вариантов один из них получает оценку, превышающую критерий, то этот вариант принимается как окончательный и построение плана прекращается.

Процесс выбора варианта происходит следующим образом. При наличии двух равноценных действий из клетки $g_i$ одно из них запоминается, а второе принимается для выполнения. (Случай существования трех и более разветвлений плана из одной клетки, во избежание чрезмерного усложнения автомата, не рассматривается, хотя необходимые здесь процедуры принципиально не отличаются от описываемых.) Одновременно запоминается порядковый номер этапа плана, на котором произошло разветвление, и построение плана продолжается до возникновения следующего варианта. При втором разветвлении возможного пути производятся те же действия, что и в предыдущем случае, и построение плана продолжается до достижения намеченной подцели. В процессе построения плана запоминается последовательность клеток второго уровня, через которые предполагается передвижение автомата.

По окончании построения первого варианта плана подсчитывается его показатель ценности и, если он оказывается ниже критерия, вариант и его показатель ценности запоминаются, а автомат переходит к построению следующего варианта. Для этого он возвращается в клетку последнего разветвления плана, выполняет запомненное ранее действие и продолжает построение плана по описанным правилам. После окончания построения второго варианта подсчитывается его показатель ценности, и, если он оказывается ниже критерия, автомат возвращается в клетку предпоследнего

разветвления и продолжает просмотр новых вариантов. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет выбран удовлетворительный вариант или не окажутся просмотренными все возможные. В последнем случае для выбора лучшего варианта используются запомненные показатели ценности. В качестве окончательного выбирается вариант, имеющий максимальный показатель ценности. Процесс выбора варианта плана схематично показан на рис. 22.

Таким образом, результатом работы блока планирования является построение двухуровневого плана движения. Верхний уровень плана указывает общее направление движения

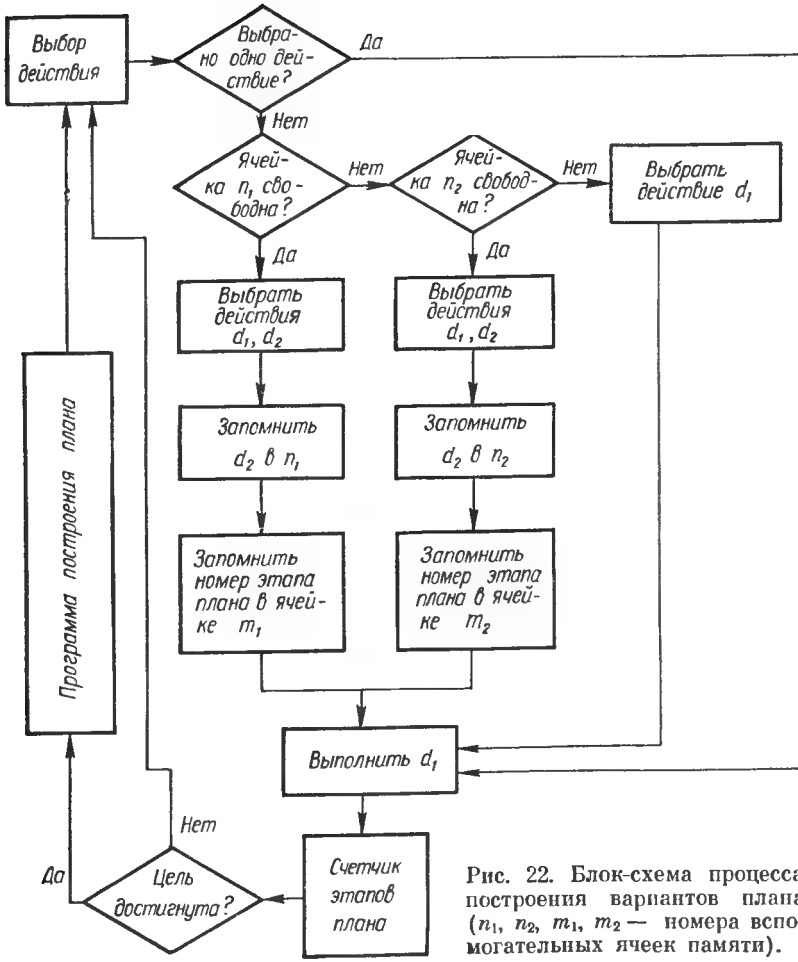



Рис. 22. Блок-схема процесса построения вариантов плана ($n_1$, $n_2$, $m_1$, $m_2$ — номера вспомогательных ячеек памяти).

на заданном участке среды; нижний уровень «расшифровывает» эту общую идею движения применительно к конкретным особенностям среды.

Каждый этап плана нижнего уровня представляет собой переход автомата из одной клетки второго уровня в другую. Для контроля за выполнением плана в автомате предусмотрено запоминание последовательности номеров этих клеток. При реальном передвижении автомата в среде специальная следящая система «по результатам» производит определение положения автомата на втором уровне внутренней модели среды и проверку соответствия этого положения запланированному. Кроме контроля за результатами действий автомата производится также и контроль «эмоционального» соответствия реальных и запланированных действий. Это осуществляется следующим образом. Как говорилось ранее, при построении плана автомат пользуется оценками различных клеток среды, сформированными в его эмоциональной сфере. Выбрав определенный план, автомат, на основе этих оценок, формирует последовательность ожидаемых «неприятных» эмоциональных воздействий. При выполнении плана специальная система следит за тем, чтобы реальные «неприятные» воздействия не превышали ожидаемых. Такой постоянный контроль «по результатам» и «по чувствам» за выполнением намеченного плана позволяет автомату более гибко и адекватно реагировать на случайные отклонения от запланированного пути или несоответствие реальной среды той, которая была воспринята при стратегическом осмотре.

## § 5. *Реализация М-автомата РЭМ*

Из предыдущего описания автомата РЭМ видно, что его функционирование может быть естественным образом разделено на два этапа. Первый— процесс построения плана двигательного поведения. Этот вид деятельности выполняется автоматом без непосредственных перемещений в среде и заканчивается формированием двухуровневого плана передвижения. Второй этап состоит в выполнении плана, т. е. в реальном передвижении в среде, и заканчивается в момент достижения цели или при обнаружении значительных отклонений от плана. В последнем случае, а также если достигнутая цель была только промежуточной и необходимо продолжить движение, автомат опять переходит к выполнению первого этапа, затем второго и т. д., до момента достижения главной цели, заданной экспериментатором.

Относительная самостоятельность функции М-автомата на каждом из этапов позволила нам реализовать автомат РЭМ в виде двух взаимодействующих моделей — планирова-

ния и выполнения планов двигательного поведения. Необходимость такой раздельной реализации была обусловлена малым объемом оперативной памяти той ЦВМ, которой мы могли пользоваться для машинного представления и экспериментального исследования РЭМа. Ниже мы еще вернемся к обсуждению преимуществ и недостатков, связанных с выбранным способом реализации автомата, а пока остановимся кратко на особенностях конкретного представления основных функций переработки информации и поведения в обеих моделях.

**Модель планирования РЭМ-1.** РЭМ-1 — неполный М-автомат — реализован в виде двух последовательно работающих программ для ЦВМ М-220. Первая программа предназначена для построения оценочных *P*-поверхностей. Исходной информацией для нее служат сведения о расположении объектов в среде, «субъективной» оценке каждого из объектов М-сетью РЭМа-2 и положении главной, заданной экспериментатором цели. Программа выделяет в среде участок для стратегического осмотра, определяет, если это необходимо, положение промежуточной цели и строит *P*-поверхности, соответствующие различным уровням внутренней модели среды.

Как уже упоминалось, каждая клетка верхнего уровня внутренней модели среды является представителем упорядоченной (пространственно) совокупности клеток предыдущего уровня. При реализации автомата РЭМ-1 был зафиксирован размер участка среды, осматриваемого автоматом в режиме планирования, и положение автомата внутри этого участка. Принято, что автомат осматривает участок длиной в 27 и шириной в 12 клеток. При этом сам автомат расположен в средней клетке нижней границы участка. Таким образом, нижний уровень внутренней модели среды представлен 324 *i*-моделями клеток. Общее количество формируемых автоматом уровней внутренней модели среды ограничено тремя. Все клетки одного уровня имеют одинаковые размеры, т. е. состоят из одинакового количества клеток предыдущего уровня. Зафиксировав способ пространственного объединения клеток каждого уровня, мы выделили 36 клеток второго уровня и 6 клеток третьего уровня внутренней модели среды (см. рис. 20).

В принципе, стратегический осмотр и оценки различных объектов среды, необходимые для построения *P*-поверхностей всех уровней, должны производиться автоматом РЭМ-2, а результат осмотра должен передаваться программе построения *P*-поверхностей вообще без участия экспериментатора. Однако, поскольку, в силу ряда технических ограничений, мы вынуждены были строить модели РЭМ-1 и РЭМ-2 в виде отдельных программ для ЦВМ, решено было использовать

это обстоятельство для проведения дополнительных самостоятельных экспериментальных исследований каждой из моделей. В связи с этим было предусмотрено осуществление всех «контактов» между РЭМ-1 и РЭМ-2 через человека-экспериментатора. Это позволило нам, во-первых, произвести отладку и настройку всех программ вне связи друг с другом (что весьма существенно при работе со сложными моделями) и, во-вторых, достаточно подробно исследовать поведение моделей, делая упор на выявление и иллюстрацию специфических особенностей каждой из них в отдельности.

Для обеспечения самостоятельного исследования моделей оказалось необходимым организовать дополнительную подготовку исходной для каждой модели информации. Так, например, для первой программы автомата РЭМ-1 — программы построения оценочных $P$-поверхностей — необходимо задавать информацию не только о расположении объектов в среде, но и об оценке каждого типа объекта. Такие оценки могут быть предварительно сформированы автоматом РЭМ-2 или заданы непосредственно экспериментатором.

Задание среды для программы построения оценочных $P$-поверхностей производилось следующим образом. В каждую клетку среды, содержащую определенный объект, заносился не знак этого объекта (номер $i$-модели М-сети автомата РЭМ-2), а некоторая условная величина, соответствующая оценке данного объекта. Подбором соотношений оценок различных объектов задавался тип М-автомата.

Значительное влияние на вид $P$-поверхностей оказывает также задаваемая экспериментатором оценка клетки «цель» («сила цели»). Чем выше эта оценка, тем больше крутизна начальной $P$-поверхности и, следовательно, выше вероятность выбора автоматом таких этапов плана, которые проходят через клетки, расположенные вдоль минимального маршрута — прямой, соединяющей клетки автомата и цели. Задавая различные «силы цели», можно проследить измене-

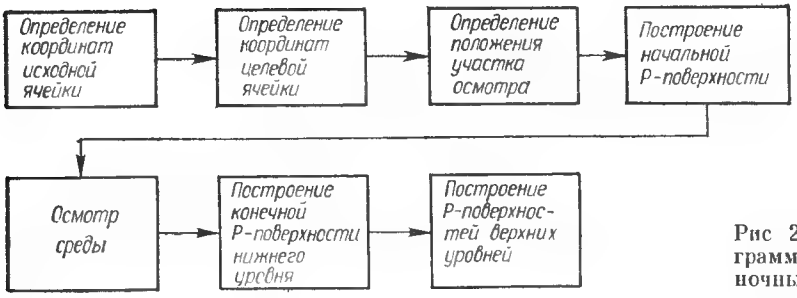



Рис 23. Блок-схема программы построения оценочных поверхностей.

ние планов поведения автомата. Представляет интерес также сопоставление планов поведения автоматов различных типов при одинаковых «силах цели».

Блок-схема программы построения оценочных *P*-поверхностей приведена на рис. 23. Программа написана для ЦВМ М-220 и содержит около 1100 команд. Время работы ЦВМ по данной программе составляет примерно полторы минуты.

В другой программе, реализующей РЭМ-1,— построение плана двигательного поведения — используются сформированные конечные *P*-поверхности и, кроме описанных ранее механизмов планирования, содержится также дополнительный алгоритм коррекции «К». Алгоритм производит такую коррекцию *P*-поверхности второго уровня, которая облегчает автомату определение направления на цель. Как уже было описано выше, в процессе планирования автомат «мысленно» переходит из одной клетки второго уровня внутренней модели среды в другую — соседнюю. Выбор направления «шага» зависит от величины оценки соответствующей клетки. Для того чтобы на каждом этапе плана, т. е. после каждого «мысленного шага», автомат не терял общего направления на цель, алгоритм «К» увеличивает оценку (на втором уровне внутренней модели) одной или двух соседних клеток из окрестности автомата, ближайших к клетке, содержащей цель. Таким образом, алгоритм «К» играет роль своеобразного компаса. Коррекция при помощи алгоритма «К» представляет собой третий этап уточнения внутренней модели среды. Измененная в результате последовательных коррекций *P*-поверхность отражает уже не только оценки объектов среды и начальное взаимное расположение автомата и цели, но и учитывает потенциальное изменение положения автомата относительно цели в процессе последующего выполнения плана.

Увеличение на каждом этапе плана оценок определенных клеток окрестности автомата следует понимать как компонент «силы стремления» к цели или «установку» для ее достижения. Изменяя величину корректирующих добавок, можно проследить влияние этого параметра на процесс построения автоматом планов двигательного поведения.

Блок-схема программы построения планов поведения приведена на рис. 24. Программа содержит около 1200 команд ЦВМ М-220. Время ее работы составляет одну—три минуты и зависит от количества просматриваемых автоматом вариантов плана.

**Модель передвижения РЭМ-2.** РЭМ-2 представляет собой полный М-автомат, организующий целенаправленное двигательное поведение. Процессы переработки информации, обеспечивающие автомату адекватность реакций на различные

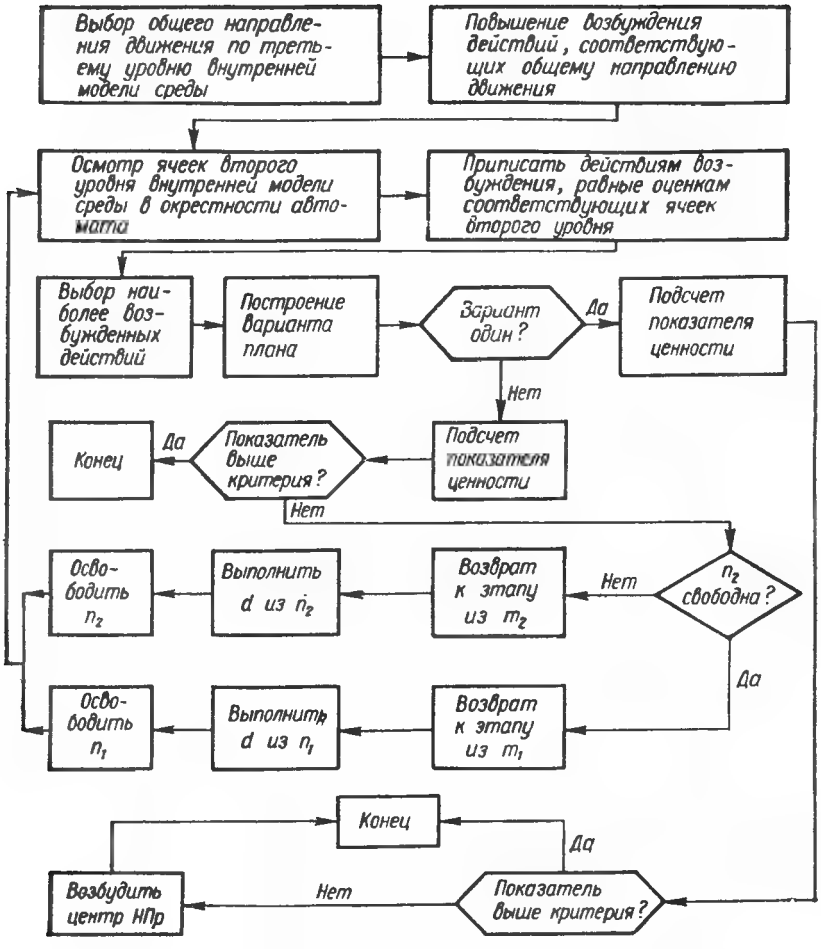



Рис. 24. Блок-схема программы построения планов. Обозначения те же, что и на рис. 22.

ситуации среды, осуществляются М-сетью, содержащей 90 $i$-моделей и 400 связей.

Автомат реализован в виде программы для ЦВМ М-220. Программа допускает изменение количества $i$-моделей и связей М-сети автомата, причем максимальное количество $i$-моделей не должно превышать 300, а максимальное количество связей — 1200. Все $i$-модели сети могут быть разделены не более чем на 30 групп, каждая из которых может иметь отличные от остальных параметры характеристик $i$-моделей. Введенные ограничения на максимальное количество элементов М-сети обусловлены объемом памяти и степенью быстродействия используемой ЦВМ М-220.

Как уже отмечалось, в автомате РЭМ не реализованы функции обучения и самоорганизации. Конкретно это выражается в том, что в процессе функционирования автомата проходимости связей и характеристики $i$-моделей его М-сети не изменяются.

Для удобства предварительной организации и настройки М-сети автомата принято, что каждая связь может быть либо усиливающей, либо тормозной. Величина проходимости связи выбирается в диапазоне от 0 до 1. Задание вида (тормозного или усиливающего), а также конкретной величины проходимости той или иной связи производилось в основном эвристически. Аналогично задавались и параметры характеристик $i$-моделей. В дальнейшем, при настройке автомата, осуществлялась необходимая коррекция — изменение проходимостей отдельных связей, изменение «знака», т. е. установление усиливающей связи взамен тормозной или наоборот, а также изменение значений параметров характеристик $i$-моделей.

Вид характеристик $i$-моделей был задан в соответствии с представлениями исходной гипотезы. Конкретно для реализации каждой из характеристик $i$-моделей выбраны следующие функции.

1. Характеристика торможения:

$$K_i^t = K_{\text{н}i} - K \sum_{j=1}^{m} (\Pi_j^{t-1} \cdot \tilde{R}_{ij}), \tag{6.3}$$

где $K_i^t$ — текущее значение коэффициента возбудимости $i$-й $i$-модели; $K_{\text{н}i}$ — начальное значение коэффициента возбудимости $i$-й $i$-модели; $m$ — количество тормозных связей, подходящих к $i$-й $i$-модели; $\Pi_j^{t-1}$ — возбужденность $i$-моделей, имеющих связи, направленные к $i$-й $i$-модели; $R_{ij}$ — проходимость тормозных связей, подходящих к $i$-й $i$-модели; $K$ — коэффициент пропорциональности.

2. Характеристика затухания:

$$\Pi_i^t = \Pi_i^{t-1} \cdot \alpha, \tag{6.4}$$

где $\alpha$ — коэффициент затухания возбужденности $i$-й $i$-модели, $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$.

3. Характеристика возбуждения:

$$\Pi_i^t = K_{\text{н}i} \cdot \ln \sum_{j=m+1}^{n} (\Pi_j^{t-1} \cdot R_{ij}), \tag{6.5}$$

где $n$ — общее количество связей, подходящих к $i$-й $i$-модели; $R_{ij}$ — проходимости усиливающих связей, подходящих к $i$-й $i$-модели.

Характеристики гипертрофии и адаптации для $i$-моделей М-сети автомата РЭМ не задавались.

Передача возбуждения в М-сети осуществляется в соответствии со следующим правилом:

$$\Pi_i^t = \begin{cases} x \text{ при } x \geqslant y, \\ y \text{ при } x < y, \end{cases} \tag{6.6}$$

где

$$x = \begin{cases} \left[ K_{\text{пi}} - K \sum_{i=1}^{m} (\Pi_j^{t-1} \cdot \tilde{R}_{ij}) \right] \cdot \ln \sum_{j=m+1}^{n} (\Pi_j^{t-1} \cdot R_{ij}) \\ \qquad \text{при } \sum_{j=m+1}^{n} (\Pi_j^{t-1} \cdot R_{ij}) > \Theta_i, \\ 0 \qquad \text{при } \sum_{j=n+1}^{n} (\Pi_i^{t-1} \cdot R_{ij}) \leqslant \Theta_i; \end{cases}$$

$$y = \Pi_i^{t-1} \cdot \alpha;$$

$\Theta_i$ — порог возбуждения $i$-й $i$-модели.

Таким образом, в каждый момент времени возбужденность $i$-модели определяется либо внешними активными и тормозными воздействиями ($\Pi_i^t = x$), либо собственным возбуждением в предыдущий момент ($\Pi_i^t = y$).

В каждый момент времени СУТ производит выбор наиболее возбужденных $i$-моделей сети, для которых выполняется условие

$$\Pi_i = \Pi_{\max} - Z, \tag{6.7}$$

где $\Pi_i$ — возбужденность $i$-й $i$-модели; $\Pi_{max}$ — возбужденность наиболее возбужденной $i$-модели сети; $Z$ — допустимая разность возбуждений для выделяемых СУТ $i$-моделей.

Возбуждения выделенных СУТ $i$-моделей изменяются следующим образом:

$$\Pi_j = \Pi_j^{\text{н}} + \frac{\Pi_s}{K}, \tag{6.8}$$

где $\Pi_j$ — возбужденность $j$-й $i$-модели после ее выделения СУТ; $\Pi_j^{\text{н}}$ — начальная возбужденность $j$-й $i$-модели; $\Pi_s$ — суммарное для всей группы выделенных $i$-моделей дополнительное возбуждение; $K$ ($K \leqslant M$) — количество выделенных СУТ $i$-моделей ($M$ — максимальная величина группы выделяемых СУТ $i$-моделей; $M$ задается экспериментатором и определяет максимальный «объем внимания»).

Если в момент $t$ $j$-я $i$-модель выделена СУТ, то в момент $t + 1$ ее возбужденность

$$\Pi_j^{t+1} = \Pi_j^t \cdot h, \tag{6.9}$$

где $h$ — коэффициент затухания возбуждения выделенных СУТ $i$-моделей, $0 \leqslant h \leqslant 1$, $h < \alpha$.

Затухание возбуждения $i$-й $i$-модели по зависимости (6.9) происходит до тех пор, пока в какой-то момент времени она не окажется вне выделенной СУТ группы $i$-моделей. После этого изменение ее возбуждения подчиняется общему правилу пересчета (6.6), принятому для М-сети автомата РЭМ.

Блок-схема программы, реализующей автомат РЭМ-2, приведена на рис. 25. Программа содержит около 1200 команд. Время ее работы зависит от количества элементов ($i$-моделей и связей) М-сети и количества тактов (моментов дискретного времени) функционирования автомата. Для М-сети, содержащей 90 $i$-моделей и 400 связей, один такт работы, т. е. один пересчет, занимает примерно полторы минуты машинного времени ЦВМ М-220.

При передвижении в среде РЭМ-2 пользуется планом, сформированным для этой же среды автоматом РЭМ-1. Если план оказывается неудачным и РЭМ-2 не в состоянии его выполнить, т. е. при рассогласовании «по чувствам» или «по результатам» плана и реального передвижения автомата, то возникает необходимость в построении нового плана, учитывающего изменившееся «эмоциональное» состояние автомата РЭМ-2. В этом случае РЭМ-2 формирует новые оценки объектов среды и новые критерии оценки плана поведения, которые и служат исходной информацией для работы автомата РЭМ-1. РЭМ-1 формирует новый план, передает его РЭМу-2 и т. д. Таким образом происходит взаимодействие автоматов. Посредником при этом является человек-экспериментатор, функции которого весьма ограничены и состоят в основном в периодической замене определенных перфо-

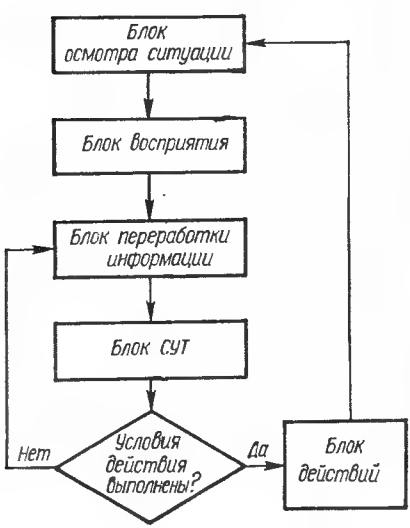



Рис. 25. Блок-схема программы, реализующей М-автомат РЭМ-2.

карт и вводе соответствующей программы в вычислительную машину. Несмотря на очевидную возможность автоматизации таких функций, т. е. передачи их самой машине, мы предпочли все же не объединять модели РЭМ-1 и РЭМ-2 в одну комплексную модель. Из сопоставления затрат машинного времени на просчет каждой из программ, составляющих автомат РЭМ, видно, что все построение плана занимает примерно столько же времени, сколько один такт работы М-сети автомата РЭМ-2. Если к тому же учесть, что для анализа процессов в М-сети необходимо хотя бы 15—20 тактов ее работы, становится понятным наше стремление сделать каждую из моделей как можно более самостоятельной. В противном случае вряд ли можно было бы надеяться на достаточно полное исследование модели планирования. Что же касается модели выполнения плана, т. е. РЭМа-2, то отсутствие непосредственной связи с РЭМом-1, в принципе, может отразиться на его работе только при нарушении плана. Поэтому мы выбрали такую схему исследования РЭМа-2, в которой нарушение плана поведения либо вообще не требовало дальнейшего продолжения эксперимента, либо требовало коррекции М-сети РЭМа-2, а не перестройки плана.

Не следует, однако, считать, что мы полностью отказались от исследования взаимодействия автоматов РЭМ-1 и РЭМ-2. Напротив, такое исследование составляло одну из важных задач нашей работы, поскольку необходимо было проверить целесообразность построения неполных М-автоматов. Однако такую проверку решено было сделать заключительным этапом экспериментального исследования автомата РЭМ.

Тактическая схема наших исследований состояла в следующем. На первом этапе необходимо было рассмотреть влияние на процесс построения плана таких параметров, как оценка объектов среды, «сила цели» и взаимное расположение автомата и цели в среде. Кроме того, следовало выяснить влияние различных параметров на количество просматриваемых автоматом вариантов плана поведения.

На втором этапе предполагалось выбрать один из наиболее характерных планов для данной среды и настроить автомат таким образом, чтобы выполнение этого плана не вызывало резких положительных или отрицательных «эмоциональных» реакций автомата. Впоследствии изменением структуры и параметров М-сети автомата мы надеялись продемонстрировать влияние предварительной организации на характер генерируемого автоматом поведения. Кроме того, необходимо было исследовать влияние ряда параметров М-сети и СУТ на процесс формирования внешних и внутренних реакций автомата.

И, наконец, на третьем этапе было решено проверить согласованность работы моделей планирования и выполнения плана и провести комплексное исследование автомата РЭМ.

*Глава 7*

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ С М-АВТОМАТОМ РЭМ**

## § 1. *Экспериментальное исследование М-автомата РЭМ-1*

На этом этапе исследовалось влияние некоторых параметров, определяющих тип автомата, т. е. его отношение к объектам среды, на построение планов двигательного поведения. Рассматривалось поведение автоматов Т1, Т2 и Т3, имеющих различные соотношения оценок объектов среды. Автоматы функционировали в среде, содержащей три типа объектов — «положительные» (Р1), «сильно отрицательные» (Р2) и «слабо отрицательные» (Р3) (рис. 26). Задание типа автомата производилось подбором соотношений оценок объектов среды (табл. 2).

Поскольку планирование поведения осуществлялось автоматом для достижения цели, представляло интерес исследовать влияние «силы цели» на выбор плана передвижения в среде. Силы цели задавались в диапазоне от 10 до 100 *усл. ед.* Исследование проводилось в двух режимах: 1) достижение определенной клетки среды, расположенной внутри осматриваемого автоматом участка; 2) построение плана достижения клетки, расположенной вне осматриваемого участка. Во втором случае выбор клетки «подцель» производился автоматом и, как показали эксперименты, зависел от его типа и «силы» главной цели. На рис. 27 показан пример изменения положения клетки «подцель» и планы, построенные автоматом Т3 при силах главной цели $A_1 = 10$, $A_2 = 30$, $A_3 = 50$ (при $A = 70$ и $A = 90$ положение подцели

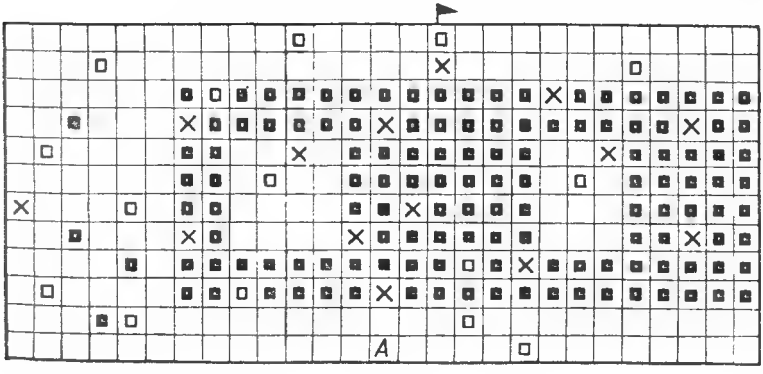



Рис. 26. Среда автомата РЭМ-1 (□ — объект Р1, × — объект Р2, ■ — объект Р3).

Таблица 2

| Тип автомата | Оценка объектов среды, *усл. ед.* | | |
|---|---|---|---|
| | P1 | P2 | P3 |
| T1 | 35 | —50 | —15 |
| T2 | 35 | —35 | —10 |
| T3 | 35 | —20 | — 5 |

совпадало с выбранным при $A = 50$, поскольку эта клетка расположена на прямой, соединяющей исходную клетку автомата и цель).

**Влияние типа автомата на выбор плана.** Примеры планов, построенных автоматами с различными соотношениями оценок объектов среды при одинаковой силе цели $A = 90$, показаны на рис. 28 (планы построены для случая, когда главная цель находится вне осматриваемого участка). Как видно из рисунка, автоматы T1, T2 и T3 выбрали в качестве подцели различные клетки. Подцель, выбранная автоматом T3, расположена на прямой, соединяющей исходную клетку автомата и главную цель. Подцели автоматов T2 и T1 несколько удалены от нее. Выбранные автоматами планы также значительно отличаются друг от друга. Если планы автоматов T3 и T2 проходят через участки среды, содержащие объекты P2 и P3, то автомат T1 «избегает» отрицательных раздражителей и учитывает только расположение объектов P1. Участки среды, содержащие объекты P3 и, тем более, P2, автомат T1 «старается обходить». Соответственно план его передвижения значительно длиннее планов, построенных автоматами T2 и T3. В этой связи необходимо еще раз подчеркнуть, что единственным различием между автоматами было «индивидуальное» задание исходной информации о среде, выраженное в различных оценках объектов среды (см. табл. 2). Поскольку объекты P1 для всех трех типов автоматов оценивались одинаково, можно предположить, что поведение последних определялось в основном наличием в среде объекта P2 («сильно отрицательного»). Можно говорить, что в этом отношении автомат T3 проявил наиболее «решительный» характер, а автомат T1 — наиболее «осторожный».

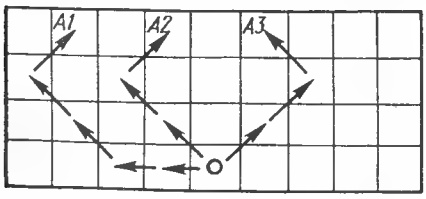



Рис. 27. Планы поведения, построенные автоматом T3 (режим 2) при различных «силах цели».

Представляет также интерес сопоставление планов поведения автоматов Т1, Т2 и Т3, построенных ими в режиме 1 (цель находится внутри осматриваемого участка). Пример планов для силы цели $A = 30$ приведен на рис. 29. Видно, что автомат Т3 и в этом случае строит наиболее короткий план достижения цели.

**Влияние «силы цели».** Эксперименты показали, что выбираемые автоматами планы передвижения в среде существенно зависят от «силы цели». С увеличением последней автоматы всех типов «стремятся» сократить путь. Пример изменения плана (в режиме 1) автоматом Т1 показан на рис. 30 для $A_1 = 10$, $A_2 = 30$, $A_3 = 70$ и $A_4 = 90$. Если при $A = 10$ план автомата состоял из 11 этапов и предусматривал обход участка среды с объектами Р2 и Р3, то при $A = 90$ он оказался сокращенным до четырех этапов и проходит через

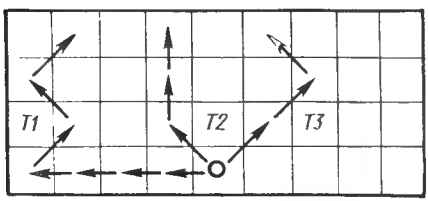



Рис. 28. Планы поведения, построенные автоматами с различными «характерами» (режим 2).

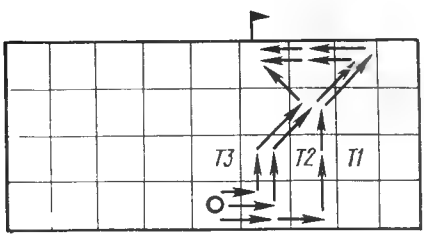



Рис. 29. Планы поведения, построенные автоматами с различными «характерами» (режим 1).

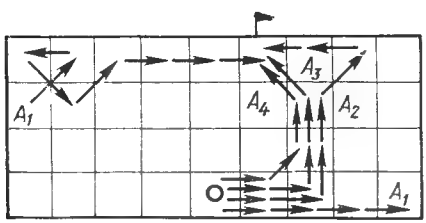



Рис. 30. Планы поведения, построенные автоматом Т1 при различных «силах цели».

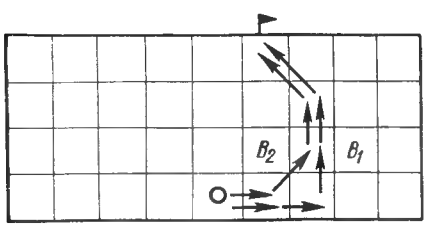



Рис. 31. Планы поведения, построенные автоматом Т1 при различных установках на достижение цели.

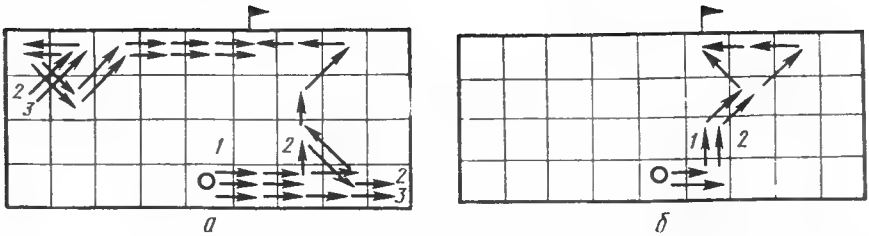


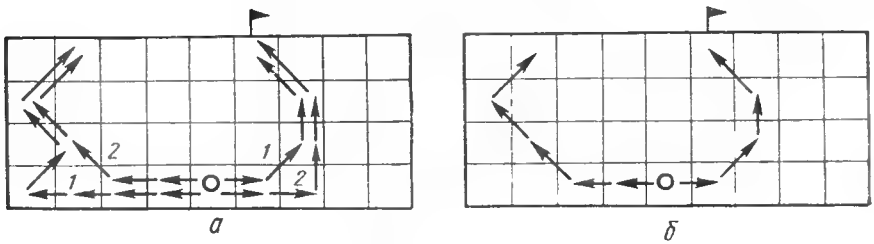

Рис. 32. Варианты плана поведения, построенные автоматами с различными «характерами»:
*а* — автоматом Т1; *б* — автоматом Т3.

«неприятные» для автомата участки. Увеличение «силы цели» вынуждает даже автомат с «осторожным» характером предпринимать (планировать) все более «решительные» действия. При этом оказываются весьма близкими планы, построенные «решительным» автоматом при малых «силах цели» и «осторожным» — при больших.

При описании М-автомата были выделены два компонента «стремления» автомата достичь цель. Действие одного из них — «силы цели» — рассмотрено нами выше. Второй компонент — «установка» на достижение цели ($B$) — также оказывает значительное влияние на выбор плана передвижения (см. описание работы алгоритма «К»). На рис. 31 показано изменение планов, выбираемых автоматом Т1 в режиме 1 при $A = 90$ для $B_1 = 150$ и $B_2 = 200$ *усл. ед.* С увеличением $B$ повышается «целеустремленность» поведения автомата. (Все предыдущие рисунки планов даны для $B = 150$.)

**Влияние типа автомата и «силы цели» на количество вариантов плана.** При выборе того или иного плана поведения автомат, как правило, предварительно просматривает несколько возможных вариантов. В проведенных экспериментах количество вариантов плана не превышало трех. Для всех автоматов замечена определенная корреляция между «силой цели» и количеством просматриваемых вариантов: чем

Рис. 33. Планы поведения, построенные автоматом Т1 при различных установках $B$ на достижение цели в режимах 1 и 2:
*а* — $B = 150$; *б* — $B = 200$.



выше «сила цели», тем меньшее количество вариантов плана строит автомат. Аналогичный эффект характерен и для планов поведения человека. Эксперименты показали, что наибольшее количество вариантов строит автомат Т1. На рис. 32 показаны варианты плана передвижения, просмотренные автоматами Т1 и Т3 для $A = 10$ и $B = 150$. Варианты строились в порядке, указанном цифрами на рисунке. После построения каждого из вариантов автомат подсчитывал и запоминал его показатель ценности. Так, для планов, построенных автоматом Т1, показатели ценности были равны соответственно 899, 995 и 983 *усл. ед.* В качестве окончательного выбран второй вариант. Для автомата Т3 показатели ценности построенных им планов были равны соответственно 1396 и 1286 *усл. ед.* Выбран первый вариант. Критерий ценности планов для автоматов всех типов и при всех «силах цели» задавался одинаковым и равным 5000 *усл. ед.* Выбор критерия ценности, заведомо превосходящего показатель ценности любого из просматриваемых автоматами планов, позволил сравнить «способность» различных автоматов к построению вариантов плана.

Как показали эксперименты, на количество и выбор построенных автоматом вариантов плана оказывает существенное влияние параметр $B$. На рис. 33 приведены планы автомата Т1 в режимах 1 (правые части рисунков) и 2 (левые части рисунков) при $A = 90$ и $B = 150$; $A = 90$ и $B = 200$. При $B = 150$ в обоих режимах просмотрено по два варианта. Порядок просмотра вариантов соответствует их нумерации на рисунке. Выбранными оказались второй вариант в режиме 1 и первый вариант в режиме 2. В то же время при $B = 200$ были выбраны планы, соответствующие отвергнутым варпантам при $B = 150$. Более длинные планы, выбранные автоматом при $B = 150$, в этом случае вообще не просматривались.

Интересно изменение вариантов плана, построенных автоматом Т1 в режиме 1, при увеличении параметра $B$ и $A = 10$ (на рис. 32, *а* $B = 150$, на рис. 34 $B = 200$). В обоих случаях просмотрено по три варианта, но конфигурация планов, как видно из сравнения рисунков, различна. Порядок просмотра вариантов соответствует их нумерации на рисунке. В обоих случаях выбраны вторые варианты.

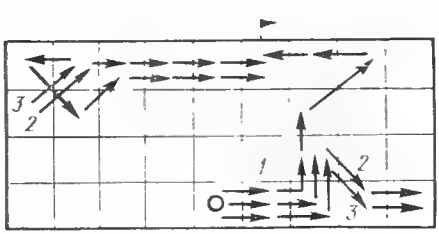



Рис. 34. Варианты плана поведения, построенные автоматом Т1 в режиме 1 ($A = 10$, $B = 200$).

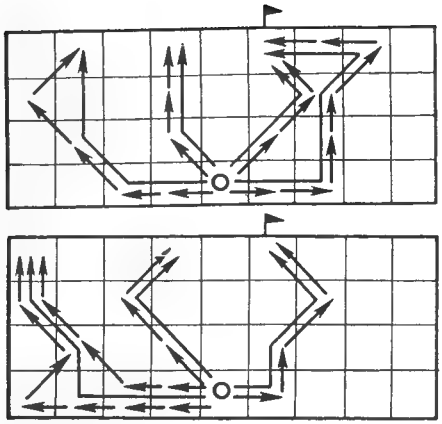


Рис. 35. Планы поведения, построенные испытуемыми (сплошные линии) и автоматами (пунктирные линии).

(Напомним, что для автомата среда имеет вид цилиндра с винтовым расположением клеток. Этим обстоятельством объясняется переход плана на рисунках из правой части среды в левую.)

**Сопоставление планов поведения человека и автомата.** Сопоставление планов, построенных автоматами, с планами, выбранными людьми в аналогичной условной среде, показало хорошее совпадение. На рис. 35 представлены планы, выбранные различными испытуемыми (сплошные линии) и автоматами (штриховые линии) при планировании поведения в одинаковых средах.

Мы полагаем, что оценка адекватности планов на основе сравнения психологических и машинных экспериментов может рассматриваться как модификация выдвинутого Тьюрингом критерия оценки «разумности» поведения машин (моделей). Процедура, предложенная Тьюрингом, предусмат-

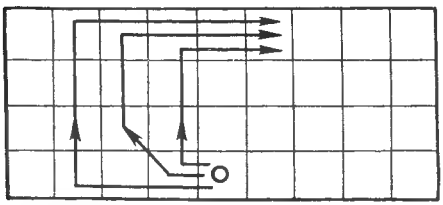


Рис. 36. Планы, построенные испытуемыми (режим 1).

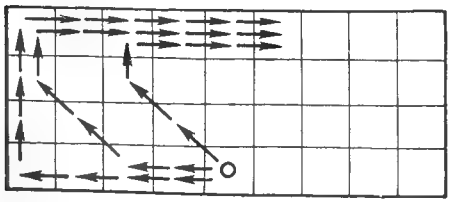


Рис. 37. Планы поведения, построенные автоматом Т4 (режим 1).

ривает распознавание человеком-наблюдателем поведения модели и моделируемого объекта (человека) по ряду внешних признаков этого поведения [57]. Из рис. 35 видно, что в условиях проведенного нами эксперимента поведения модели и человека-испытуемого практически неразличимы.

В психологическом эксперименте для некоторых испытуемых были получены планы поведения, не соответствующие планам, построенным автоматами при оценках, указанных в табл. 2. Примеры таких планов показаны на рис. 36. При анализе отчетов испытуемых, показавших эти результаты, было сделано предположение, что имеется существенное отличие в оценках, субъективно даваемых испытуемым различно окрашенным клеткам, и оценках объектов среды, заданных автомату по табл. 2. Введение четвертого типа автомата — Т4 со следующими оценками (объект Р4 обозначает пустую клетку среды)

| Р1 | Р2 | Р3 | Р4 |
|---|---|---|---|
| 35 | —100 | —50 | 20 |

позволило получить в модельном эксперименте планы (рис. 37), близкие к показанным на рис. 36.

Итак, на основании анализа планов поведения, построенных М-автоматом, и сравнения их с планами, выбираемыми испытуемыми в психологическом эксперименте, может быть сделан вывод о правомерности исходных предположений относительно процесса построения человеком планов двигательного поведения. Однако ряд введенных в М-автомат ограничений (например, объединение на высших уровнях внутренней модели среды ячеек нижних уровней не по их «содержанию», а только по пространственному признаку) свидетельствует о том, что автомат еще не достаточно полно отражает специфику построения планов двигательного поведения человеком и не учитывает некоторых (возможно, важных) механизмов этого рода деятельности. На устранение указанных недостатков было направлено дальнейшее совершенствование автомата.

## § 2. *Семантика М-сети автомата*

Для того чтобы иметь возможность оценивать адекватность внешних и внутренних реакций автомата в процессе передвижения в среде, принята определенная содержательная интерпретация объектов среды. Соответственно этой интерпретации выбрана и семантика элементов М-сети автомата, что позволило определенным образом задать ее организацию.

Три типа объектов среды — «положительный» Р1, «сильно отрицательный» Р2 и «слабо отрицательный» Р3 содержательно интерпретировались как «пища», «зверь» и «лес».

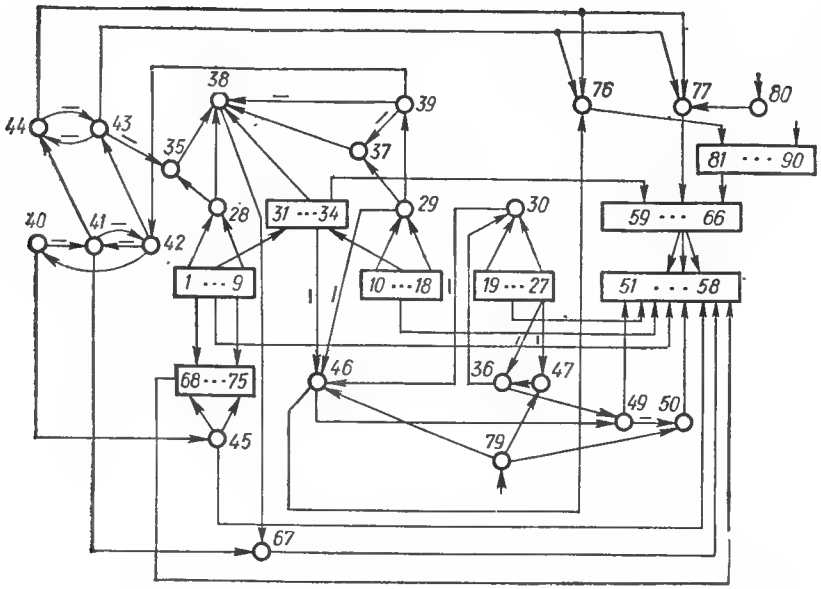



Рис. 38. Структура М-сети автомата РЭМ: ⟶ — усиливающая связь; ⟹ — тормозная связь.

Структура М-сети автомата схематически изображена на рис. 38. В соответствии с семантической интерпретацией *i*-моделей в сети выделены четыре взаимосвязанные сферы — логическая, эмоциональная, двигательная и сфера «желаний».

Первый уровень логической сферы составляют три группы по девять *i*-моделей (с 1-й по 27-ю *i*-модель на схеме рис. 38), соответствующие пространственным положениям объектов среды («пища слева», «лес сверху», «зверь снизу» и т. д.). Обобщение воспринимаемой извне информации происходит на втором и третьем уровнях логической сферы. Каждая группа *i*-моделей первого уровня (пространственные положения одного объекта) представлена одной *i*-моделью на втором уровне — понятия «пища» (*i*-модель 30), «зверь» (*i*-модель 28) и «лес» (*i*-модель 29). (В дальнейшем вместо выражения «*i*-модель...» будем в скобках писать только соответствующий этой *i*-модели номер на схеме структуры автомата.) Семантика остальных *i*-моделей логической сферы выбрана следующей: «лес вокруг» (37), «опасность снизу» (31), «опасность слева» (32), «опасность сверху» (33), «опасность справа» (34), общее понятие «опасность» (38), «любопытство» (39), «отсутствие объектов» (46), «зверь встречается часто» (35).

Эмоциональная сфера М-автомата представлена *i*-моделями «гнев» (40), «страх» (41), «удовольствие» (42) и инте-

гральными центрами эмоциональной оценки «приятно» — Пр (43) и «неприятно» — НПр (44).

Двигательная сфера М-автомата представлена тремя уровнями *i*-моделей — простые действия (51—58), сложные действия (59—66) и составное действие (77).

В сферу «желаний» включены *i*-модели «действовать» (49), «не действовать» (50), «действовать быстро» (67), «двигаться по плану» (76) и «нападать» (45).

Возбуждение *i*-моделей «действовать» и «не действовать» оказывает существенное влияние на двигательное поведение автомата. В начальном состоянии возбуждена *i*-модель «не действовать», что приводит к торможению *i*-моделей простых действий. При восприятии из среды информации об окружающих объектах повышается возбуждение *i*-модели «действовать», «затормаживается» *i*-модель «не действовать» и возбуждение *i*-моделей простых действий повышается. Если при этом одно из действий выбирается СУТ или превышает некоторый установленный экспериментатором уровень, оно выполняется и автомат перемещается в среде. В процессе функционирования автомата *i*-модель «не действовать» может быть опять возбуждена при наличии достаточно сильного возбуждения связанной с ней *i*-модели «удовольствие».

Связи от первого уровня логической сферы к первому уровню двигательной сферы устанавливались, исходя из следующих соображений: автомат стремится попасть в клетку с объектом «пища»; избегает проходить через клетку с объектом «зверь», может проходить через клетку с объектом «лес», но «знает», что это связано с определенной опасностью (*i*-модель «лес» связана с *i*-моделью «опасность»).

Связи между первыми уровнями логической и двигательной сфер дают возможность получения «безусловнорефлекторного» ответа автомата на воспринимаемый объект. Коррекция этого ответа происходит благодаря наличию соответствующего распределения возбуждений на более высоких уровнях М-сети автомата. В результате «скорректированный» ответ может не совпадать и даже противоречить «безусловнорефлекторному». Так, например, при отсутствии плана движения автомат, как правило, не входит в клетку с объектом «лес», однако в том случае, когда задан план и для его выполнения необходимы действия, связанные с прохождением через клетки, содержащие объект «лес», автомат выполняет такие действия. При определенных условиях автомат может не заходить в клетки с объектом «пища» и заходить в клетки с объектом «зверь». Последнее считается допустимым только в том случае, если в М-сети автомата возбуждены *i*-модели «гнев» и «нападать». В противном случае действие рассматривается как «нелогичное» и производится коррекция проходимостей соответствующих связей.

## § 3. *Экспериментальное исследование М-автомата РЭМ-2*

В автомате РЭМ-2 отражены основные положения исходной гипотезы о программах и механизмах переработки информации мозгом человека. Теоретически такой автомат должен быть способен к организации целесообразной и целенаправленной деятельности в любой среде, содержащей объекты, представленные в его сфере восприятий. Однако было неясно, удастся ли практически подобрать такие значения параметров *i*-моделей, связей и СУТ, которые обеспечат адекватность реакций автомата. Сложность модели и использование в ней множества неформализованных пока данных исключали возможность строгого анализа и основанного на этом анализе задания «рабочего режима» автомата, т. е. такого набора параметров, который должен обеспечить как адекватность его реакций на различные ситуации среды, так и целесообразность поведения в целом. Единственным доступным способом исследования практической возможности использования М-автоматов, в частности разработанного автомата РЭМ, для решения поставленной ранее задачи организации разумного поведения было проведение серии экспериментов, направленных на выявление особенностей функционирования автоматов такого типа.

Как уже упоминалось, РЭМ был первым из разработанных нами М-автоматов. Поэтому заранее не было известно, удастся ли вообще нужным образом организовать М-сеть автомата, насколько сложной окажется эта задача и даст ли нужный эффект работа СУТ. Все эти вопросы должны были быть решены в ходе экспериментального исследования РЭМа. Кроме того, в случае положительного их решения необходимо было выяснить, насколько устойчив рабочий режим автомата, т. е. допустимы ли изменения параметров *i*-моделей и связей и, если допустимы, то к каким изменениям в поведении автомата они приводят.

При описании общей задачи формирования двигательного поведения были выдвинуты два критерия оценки поведения М-автоматов: целесообразность внешних проявлений поведения, т. е. передвижения в среде, и целесообразность «внутренних» проявлений, т. е. хода мышления. Соответственно, рабочий режим автомата должен быть выбран таким образом, чтобы удовлетворять обоим критериям. Это означает, что при подборе значений параметров *i*-моделей, связей и СУТ мы должны добиваться адекватности не только двигательных актов, но и предшествующих им «осознанных мыслей» автомата. Именно с этих позиций мы и будем в дальнейшем оценивать поведение РЭМа в различных экспериментальных ситуациях.

**Настройка автомата.** Целесообразность поведения необучающегося М-автомата, по существу, полностью зависит от выбора значений различных параметров его М-сети и СУТ. Поскольку теоретический расчет этих величин не представляется возможным, была проведена экспериментальная настройка автомата, заключающаяся в подборе проходимостей связей и характеристик *i*-моделей сети, обеспечивающих адекватность реакций автомата на отдельные типичные ситуации среды. План поведения автомату при этом не задавался. При настройке автомат помещался в отдельные заранее выбранные клетки среды, и исследовалось его поведение до выполнения первого двигательного акта. Целесообразность поведения автомата оценивалась по реакциям двух типов — внешней и внутренней.

Напомним, что внешняя реакция представляет собой действие, предпринимаемое автоматом в ответ на восприятие данной ситуации. Внутренняя реакция есть возбуждение *i*-моделей сети автомата, интерпретируемое как возникновение определенных «мыслей». Часть «мыслей», выделенная СУТ, считается «осознанной». Последовательность «осознанных мыслей» мы называем «ходом мышления» автомата, предшествующим выбору определенной двигательной (внешней) реакции. Наличие содержательных интерпретаций *i*-моделей сети и объектов среды позволяет оценить «логичность» как внешних, так и внутренних реакций автомата.

Настройка автомата предполагает подбор таких значений параметров связей, *i*-моделей и СУТ, которые обеспечивают логичность внешних и внутренних реакций автомата при заданной содержательной интерпретации элементов сети автомата и среды, в которой происходит его функционирование.

В табл. 3 приведены условные обозначения возбуждений некоторых *i*-моделей сети, используемые в дальнейшем при графических изображениях внутренних реакций автомата. Моменты времени, соответствующие на графике внутренних реакций выполнению автоматом определенных действий, отмечены стрелками, указывающими направление перемещения автомата. Вертикальными стрелками будем отмечать возбуждения *i*-моделей действий, выбранных СУТ. Поскольку не все *i*-модели сети являются одинаково важными для понимания мотивации поведения автомата, при графическом представлении внутренних реакций ограничимся изображением изменения возбуждений только некоторых из них.

Результаты экспериментального исследования адекватности реакций автомата на отдельные ситуации среды (тесты) приведены в табл. 4. Исследование проводилось с автоматом, «объем внимания» которого обеспечивал одновременное выделение СУТ нескольких (не более пяти) наиболее

Таблица 3

| Условное обозначение | Номер *i*-модели | Содержательная интерпретация |
|---|---|---|
| | 28 | «Зверь» |
| | 29 | «Лес» |
| | 30 | «Пища» |
|  | 35 | «Много зверей» |
| | 37 | «Лес вокруг» |
| | 38 | «Опасность» |
| | 39 | «Любопытство» |
|  | 40 | «Гнев» |
|  | 41 | «Страх» |
| | 42 | «Удовольствие» |
|  | 43 | «Приятно» |
|  | 44 | «Неприятно» |
|  | 45 | «Нападать» |
| | 49 | «Действовать» |
|  | 67 | «Действовать быстро» |

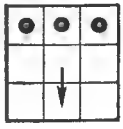
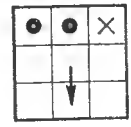
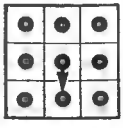
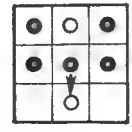
возбужденных *i*-моделей. В табл. 4 показан ход мышления автомата в различных тестовых ситуациях. Названия одновременно выделяемых СУТ *i*-моделей объединены внутри скобок. Последовательность переключений СУТ соответствует последовательности записи выражений.

На рис. 39 в качестве примера дано графическое изображение внутренних реакций автомата в ситуации 4 табл. 4. Автомат воспринимает пять объектов «лес» и два объекта «пища». В первый момент возникает «осознанная мысль» о «лесе» и «пище» и «неосознанное» представление об «опасности слева и справа». В следующий момент «осознается» общее отношение к воспринятой ситуации — «любопытство». Одновременно возникает представление о «лесе вокруг», возможной «опасности» и необходимости «действовать». Осознанная мысль «действовать» возникает в третий момент, наряду с возвращением внимания к факту наличия в ситуации «леса» и осознанием общего эмоционального состояния — «удовольствия», вызванного, очевидно, восприятием объектов «пища». В подсознании остается представление

об «опасности», «лесе вокруг» и ассоциативно возникающее представление о «звере». Возбуждаются центры интегральной оценки эмоционального состояния — Пр и НПр. Потенциальная опасность, связанная с наличием «леса», вызывает появление в подсознании чувства «страха». Однако, поскольку реальной опасности все же нет, в четвертый момент «страх» исчезает и автомат с «мыслью» о «пище» делает шаг вниз в ячейку, содержащую этот объект. Возбуждение *i*-моделей «опасность», «зверь», НПр снижается, возбуждение *i*-модели Пр возрастает. Нам кажется, что такой ход внутренних реакций автомата и его окончательная внешняя реакция — действие в общих чертах соответствуют логике поведения и рассуждения человека в аналогичной ситуации.

Изменение проходимостей связей и характеристик *i*-моделей существенно изменяет ход процессов в М-сети (внутренние реакции), а следовательно, и внешнее поведение автомата. Таким образом, можно говорить, что задание определенных значений параметров, характеризующих М-сеть, соответствует заданию определенного «характера» автомата, проявляющегося во внутренних и внешних реакциях послед-

Таблица 4

| Тестовые ситуации | Ход мышления | Тестовые ситуации | Ход мышления |
|---|---|---|---|
|  | 1<br>(«Лес»)<br>(«Любопытство» — «опасность»)<br>(«Действовать»)<br>(«Шаг») |  | 2<br>(«Лес» — «опасность сверху» — «зверь»)<br>(«Опасность»)<br>(«Быстро»)<br>(«Действовать»)<br>(«Опасность» — «шаг») |
|  | 3<br>(«Лес»)<br>(«Опасность» — «лес вокруг» — «любопытство»)<br>(«Лес»)<br>(«Действовать»)<br>(«Шаг») |  | 4<br>(«Лес» — «пища»)<br>(«Любопытство»)<br>(«Действовать» — «лес» — «удовольствие»)<br>(«Любопытство» — «пища» — «шаг») |

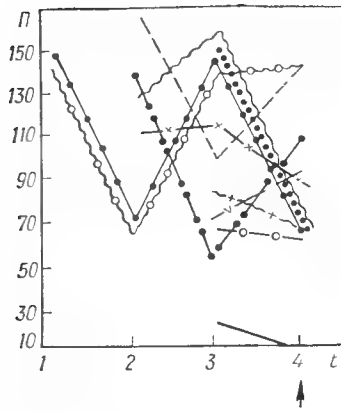



Рис. 39. Внутренние реакции РЭМа-2 в тестовой ситуации 4.

него. В качестве предварительного примера (подробно влияние «характера» на поведение автомата будет рассмотрено ниже) приведем «ход мышления» двух автоматов с различными «характерами» в ситуации 3 табл. 4. Эксперимент, в отличие от описанного выше, проводился с автоматами, имеющими малый «объем внимания». «Ход мышления» первого автомата: «лес вокруг» — «опасность» — «действовать» — шаг. «Ход мышления» второго автомата: «лес вокруг» — «опасность» — «действовать» — «любопытство» — «действовать» — шаг. Графическое изображение внутренних реакций автоматов приведено на рис. 40,*а* и *б* соответственно для первого и второго автоматов. Интересно изменение возбуждения *i*-модели «страх». Если у первого автомата «страх» растет, то у второго возбуждение *i*-модели «страх» резко падает, что позволяет предположить у него наличие более «оптимистической» оценки среды. Об этом же свидетельствует и изменение общей оценки предъявленной автомату ситуации (первая реакция — «опасность», затем переоценка ситуации — «любопытство»).

Значительное изменение параметров М-сети автомата может привести к возникновению «патологических», неадекватных реакций, а в граничном случае — к исчезновению каких-либо реакций вообще (например, при очень малых проходимостях связей и больших порогах возбуждения *i*-моделей). Естественно, что определение точных границ «нормы» и «патологии» является одной из наиболее интересных и важных задач при исследовании М-автоматов.

**Вариант «норма».** Путем настройки М-сети автомата в тестовых ситуациях выбран вариант М-автомата, поведение которого (внутренние и внешние реакции) принято за «норму». Исследовалось поведение автомата на участке среды, показанном на рис. 41. Автомату задавалось общее направление движения («вверх») и план, предусматривающий до-

стижение определенной (целевой) клетки среды (план показан на рисунке пунктиром). Траектория передвижения автомата в среде, т. е. последовательность выполняемых им простых действий, обозначена на рисунке стрелками. На рис. 42 графически изображены внутренние реакции автомата в процессе двигательного поведения. (Стрелки указывают направление шагов, выполненных М-автоматом в соответствующие моменты времени.)

В исходном состоянии автомат находится в ситуации, не содержащей каких-либо объектов. Реакцией на такую ситуацию является возбуждение *i*-модели «отсутствие объектов», что, в свою очередь, вызывает возбуждение *i*-моделей «действовать» и «любопытство». Автомат выполняет действие «вправо — вверх», удовлетворяющее одновременно как общему направлению движения, так и направлению плана на данном этапе. В новой клетке среды автомат воспринимает объекты «лес» и «зверь», что приводит к «осознанию» опасности и возбуждению чувства «страх». Возбуждение *i*-модели «любопытство» несколько уменьшается. У автомата появляется «желание» «двигаться быстро». Выполняется шаг «вправо». Автомат больше не видит «зверя», и возбуждение соответствующей *i*-модели уменьшается. Однако достаточно высокое возбуждение *i*-модели «опасность» усиливает «страх» и поддерживает «желание» «двигаться быстро». Общая эмоциональная оценка ситуации — «неприятно» (*i*-модель Пр вообще пока не возбуждена). В этой же ситуации автомат воспринимает и объект «пища», однако наличие об-

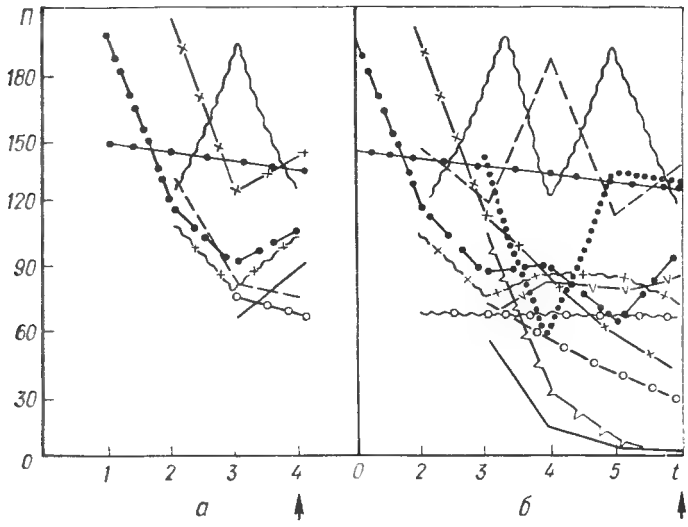



Рис. 40. Внутренние реакции М-автоматов с разными «характерами» в тестовой ситуации 3.

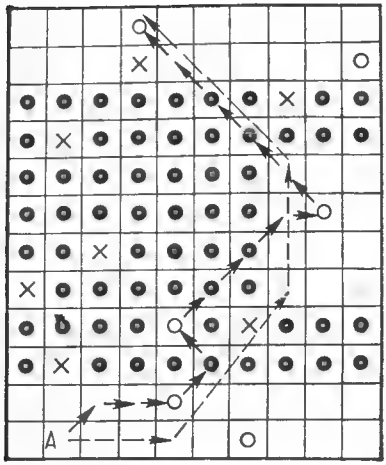



Рис. 41. Внешние реакции М-автомата «норма» (*А* — исходное положение М-автомата).

щего отрицательного эмоционального фона приводит к тому, что реакцией на «пищу» является только усиление возбуждения *i*-модели «любопытство». Автомат делает шаг «вправо», затем «вправо — вверх» (по плану) и проходит через клетку «пища» без значительных изменений своего состояния. В новой ситуации автомат воспринимает уже два объекта «пища» и осознает этот факт. Уменьшается «страх», поддерживается на высоком уровне возбуждение *i*-модели «любопытство», «желание» «действовать быстро» несколько уменьшается, снижается возбуждение *i*-модели «опасность». В этой же ситуации автомат видит и объект «зверь», однако наличие двух объектов «пища» оказывает на состояние М-сети автомата гораздо более сильное влияние.

Несмотря на то что план на данном этапе предусматривает движение «вправо — вверх», автомат выбирает действие «влево — вверх» и заходит в клетку с объектом «пища», результатом чего является возбуждение *i*-модели «удовольствие». Из этой клетки автомат продолжает движение в направлении последнего этапа плана. Поскольку отклонение от плана было незначительным, автомат уже через два шага входит в клетку, предусмотренную следящей системой «по результатам» и продолжает движение по плану. Возбуждение *i*-модели «удовольствие» снижается до тех пор, пока автомат не входит в следующую клетку с объектом «пища». Реакцией автомата на новый объект «пища» является резкое увеличение «удовольствия». Возбуждение центра Пр также увеличивается и превосходит возбуждение центра НПр. Несколько уменьшаются «страх» и «желание» «двигаться быстро». Автомат продолжает движение к цели. Сделав

14 шагов за 20 тактов, автомат достигает поставленной цели. Общая оценка автоматом пройденного пути может быть охарактеризована разностью сумм возбуждений центров Пр и НПр за весь период движения:

$$\varphi = \sum_{t=1}^{n} П_{Пр} - \sum_{t=1}^{n} П_{НПр} \qquad (7.1)$$

($n$ — количество тактов). Для описанного эксперимента эта оценка составила — 240 *усл. ед.*

Учитывая то обстоятельство, что разные пути автомат проходит за различное количество тактов, введем также «удельную оценку» пути:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi}{n}. \qquad (7.2)$$

В данном случае $\varphi_1 = -12$, что свидетельствует о некотором преобладании у автомата «отрицательных эмоций» при выполнении описанного маршрута.

Как видно из графика внутренних реакций, основная переработка информации производится на «подсознательном» уровне. Особенно явно это выражено в промежуток времени с $t_{11}$ по $t_{20}$, когда автомат при каждом такте производил какое-либо действие. Только анализ «подсознания» автомата позволяет понять причину этих действий. Например, тот факт, что у автомата не возникало в этот промежуток времени никаких «осознанных мыслей», кроме «мыслей» о дей-

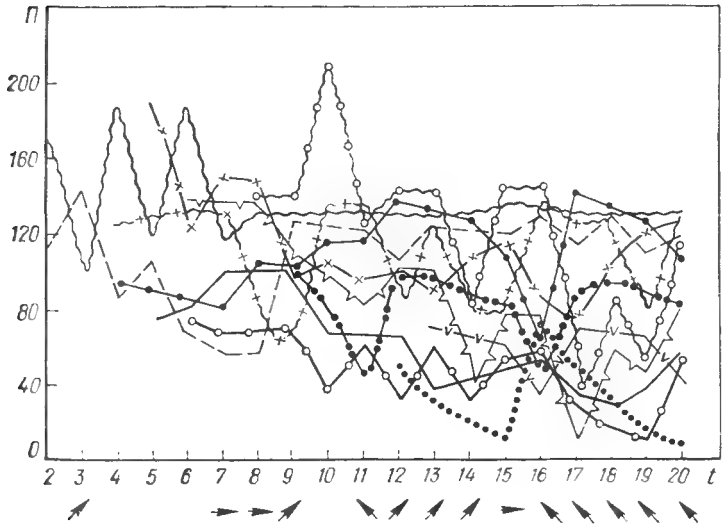



Рис. 42. Внутренние реакции М-автомата «норма».

Таблица 5

| Связь от $i$-модели | Связь к $i$-модели | Проходимость связи в сети автоматов | | |
|---|---|---|---|---|
| | | «норма» | А1 | А2 |
| 39 | 43 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| 39 | 42 | 0,1 | 0,4 | 0,1 |
| 29 | 30 | 0,01 | 0,05 | 0,01 |
| 30 | 38 | —0,1 | —0,5 | —0,1 |
| 28 | 38 | 0,5 | 0,2 | 0,5 |
| 29 | 39 | 0,085 | 0,2 | 0,085 |
| 30 | 39 | 0,3 | 0,5 | 0,3 |
| 39 | 38 | —0,05 | —0,2 | —0,05 |
| 43 | 35 | —0,5 | —0,5 | —0,05 |
| 28 | 35 | 0,1 | 0,1 | 0,5 |
| 35 | 40 | 0,3 | 0,3 | 0,5 |
| 40 | 45 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| 1 ÷ 9 | 68 ÷ 75 | 0,1 | 0,1 | 0,5 |
| 1 ÷ 9 | 51 ÷ 58 | —0,4 | —0,4 | 0,05 |

ствиях, может быть объяснен наличием возбуждения $i$-модели «действовать быстро». В момент $t_{10}$, по всей вероятности, тоже было бы выполнено действие, если бы был воспринят один, а не два объекта «пища». Восприятие же двух достаточно сильных раздражителей, даже при значительном возбуждении $i$-модели «двигаться быстро», вызвало у автомата в момент $t_{10}$ «мысль о пище». Высоким возбуждением $i$-модели «страх» объясняется то обстоятельство, что при прохождении через клетку с объектом «пища» в момент $t_8$ у автомата не возбудилась $i$-модель «удовольствие».

Анализ изменения состояния $i$-моделей сети позволяет, таким образом, производить оценку тех или иных действий автомата не только по сопровождающим эти действия «осознанным мыслям», но и по «подсознательным» побуждениям и мотивам.

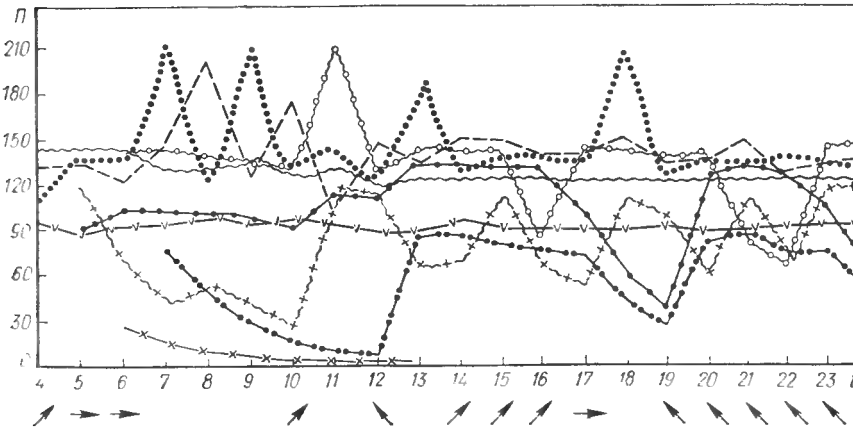
**Имитация «характера».** При настройке описанного выше автомата «норма» подбирались такие параметры М-сети, которые обеспечивали ему условно-нормальные поведенческие реакции, выраженные в определенном отношении к объектам среды. Очевидно, изменением этих параметров можно получить автоматы, в определенной мере соответствующие различным типам реакций человека. Для проверки этого предположения были построены два автомата — А1 и А2,— отличающиеся от «нормы» величиной проходимостей отдельных связей в М-сети (введенные изменения показаны в табл. 5, прочерк означает, что величина связи такая же, как у варианта «норма»).

Экспериментальное исследование автоматов А1 и А2 проводилось в тех же условиях, что и автомата «норма», т. е. каждый из них помещался в ту же среду и ему задавался такой же, как для «нормы», план передвижения. Как показали эксперименты, траектории передвижения всех трех автоматов («норма», А1 и А2) почти полностью совпали. Благодаря такому совпадению (оно не задавалось и не предвиделось заранее) оказалось возможным сопоставить состояния М-сети автоматов в промежутках между любыми двумя последовательными шагами и проанализировать причину изменения тех или иных внутренних реакций автоматов.

Как видно из сравнения рис. 43 и 44, на которых графически изображены внутренние реакции «нормы», А1 и А2, автоматы проявляют различное отношение к объектам среды. Автомат А1 совершенно не испытывает чувства «страха». Восприятие объекта «зверь» только в начальный момент возбуждает у него мысль об опасности, но даже эта мысль находится глубоко в подсознании и постепенно исчезает. Все поведение автомата А1 имеет четко выраженный положительный фон. Каждое прохождение через объект «пища» сопровождается резким повышением «удовольствия» и фиксацией внимания на этом чувстве. Выполнение заданного плана заняло у автомата А1 23 такта. При этом сумма возбуждений *i*-модели НПр равнялась нулю, а сумма возбуждений Пр — 2000 *усл. ед.*, т. е. для автомата А1 $\varphi = 2000$ и $\varphi_1 = 83$ *усл. ед.*

Для автомата А2 характерно более «критическое» отношение к среде. Прежде всего в сети автомата А2 оказались возбужденными *i*-модели «зверь встречается часто», «гнев»

Рис. 43. Внутренние реакции М-автомата А1.



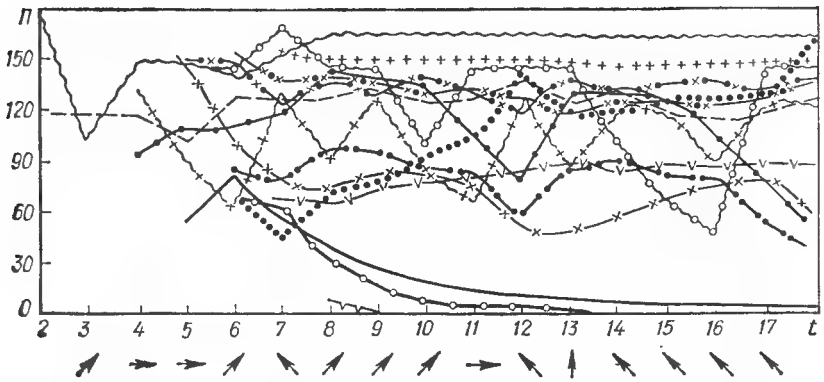



Рис. 44. Внутренние реакции М-автомата А2.

и «нападать». В клетки, содержащие объект «зверь», автомат не заходил, однако возбуждение указанных *i*-моделей существенно повлияло на ход его внутренних реакций. Все выполнение плана передвижения заняло у автомата А2 17 тактов. При этом никаких «осознанных» мыслей, кроме мыслей о действиях, не наблюдалось. На последнем этапе плана двигательные реакции у А2 несколько отличались от таковых у «нормы» и А1, однако окружающие ситуации изменились при этом незначительно, так что можно сравнить внутренние реакции А2 с внутренними реакциями А1 и «нормы». Если относительно быстрое передвижение в среде «нормы» можно объяснить возбуждением *i*-модели «двигаться быстро», вызванным чувством «страха», то у автомата А2 такое передвижение связано с возбуждением *i*-модели «нападать». Только при восприятии первого «зверя» у автомата А2 возбудилось чувство «страха», однако вслед за этим возбудилась *i*-модель «гнев» и «страх» был подавлен. На протяжении всего пути у автомата возбуждена *i*-модель «опасность», но, в отличие от «нормы», это вызывает не пассивную реакцию — «страх», а активную — «нападать». При восприятии объекта «пища» и прохождении через соответствующие клетки среды автомат проявляет адекватную реакцию в виде умеренного возбуждения чувства «удовольствия». За время выполнения маршрута сумма возбуждений *i*-модели Пр для автомата А2 составила 970 *усл. ед.*, сумма возбуждений *i*-модели НПр — 190 *усл. ед.*, т. е. для А2 $\varphi = 780$ и $\varphi_1 = 43$ *усл. ед.*

Сравнительный анализ поведений трех описанных автоматов позволяет говорить, что автомат А1 имеет «оптимистичный характер», а автомат А2 — «решительный», с несколько развитыми «агрессивными» чертами.

**Влияние режима работы СУТ на внутренние реакции автомата.** Система усиления — торможения имитирует в М-ав-

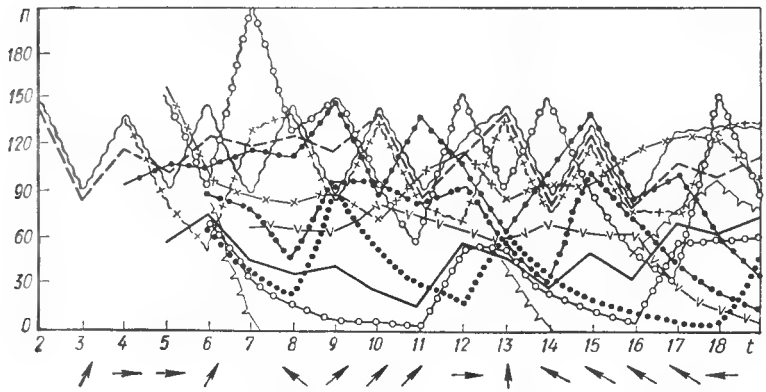


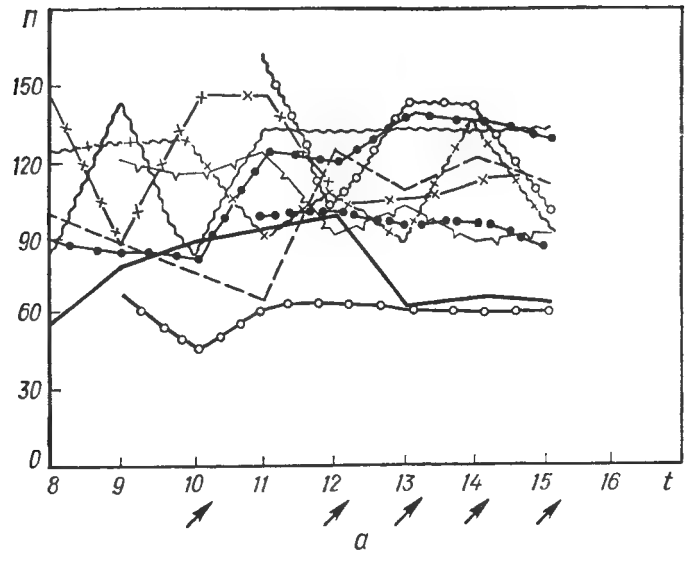

Рис. 45. Внутренние реакции М-автомата «норма» при увеличении «зоны внимания».

томате действие механизма внимания. С целью проверки эффективности деятельности СУТ как системы, упорядочивающей и организующей процесс переработки информации, было проведено экспериментальное исследование влияния изменения различных параметров СУТ на ход процессов в сети.

На рис. 45 показаны внутренние реакции автомата «норма», выполняющего описанный выше план передвижения в среде (см. рис. 41) при увеличении «зоны внимания» (параметр $Z$ в формуле (6.7) равен 10 *усл. ед.*: в предыдущем случае автомат «норма» работал с $Z = 1$ *усл. ед.*).

Автомат с увеличенной «зоной внимания» выполнил план за 18 тактов, т. е. на два такта быстрее, чем при «зоне внимания», равной 1 *усл. ед.* Как видно из сопоставления рис. 42 и 45, изменились и внутренние реакции автомата. Если при малой «зоне внимания» СУТ в каждый момент времени выделяла не более одной $i$-модели, то при увеличении зоны максимальный объем СУТ составил четыре $i$-модели. Разность суммарных возбуждений центров Пр и НПр увеличилась с —240 до 230 *усл. ед.*, т. е. с —12 до 13 *усл. ед.* на один такт. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что с увеличением объема внимания не только повышается интенсивность, но и качественно изменяется ход переработки информации (в М-сети это выражается в вовлечении в процесс переработки «осознаваемой» информации новых $i$-моделей).

Исследование изменения реакций автомата при изменении «глубины» внимания проводилось с автоматом «норма», выполняющим тот же, что и в предыдущем случае, план передвижения при «зоне внимания», равной 1 *усл. ед.* Изменялось дополнительное возбуждение от СУТ (параметр $П_в$ в формуле (6.8)), добавляемое в каждый момент времени к возбуждению выделенных СУТ $i$-моделей. Внутренние



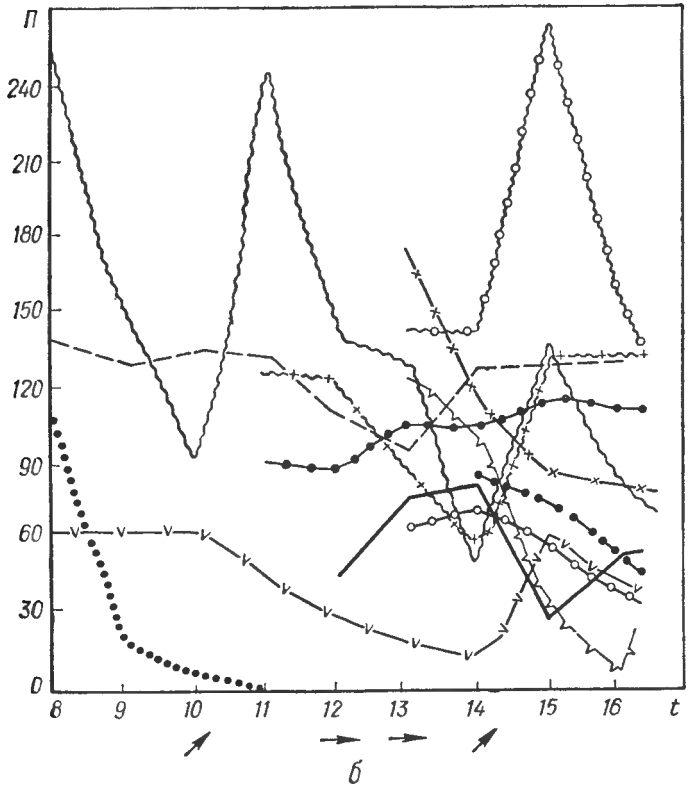




Рис. 46. Внутренние реакции М-автомата «норма» при различных дополнительных возбуждениях $i$-модели от СУТ:
$а$ — $Пs = 0$; $б$ — $Пs = 100$.

реакции автоматов с 9-го по 15-й такт при $П_s = 0$ и $П_s = 100$ *усл. ед.* показаны на рис. 46,*а* и *б* соответственно.

Автомат, у которого $B = 0$, за выбранный промежуток времени выполнил 5 шагов. При этом общее «эмоциональное» состояние автомата характеризовалось устойчивым возбуждением центра НПр и отсутствием возбуждения *i*-моделей Пр и «удовольствие», несмотря на то что автомат видел «пищу» и проходил через клетку, содержащую этот объект. Автомат, у которого $П_s = 100$ *усл. ед.*, за этот же отрезок времени выполнил 4 шага; суммарное возбуждение центра Пр составило для него почти 200 *усл. ед.*

Проведенные эксперименты показали, что изменение различных параметров СУТ («свойств внимания») существенно влияет на ход процесса переработки информации в М-сети. При увеличении объема и «глубины» внимания повышается общая активность сети, что в результате приводит к изменениям внешних реакций автомата и его «отношения» к объектам среды.

**Имитация «настроения».** При экспериментальном исследовании М-автомата было замечено, что, несмотря на отсутствие самообучения, процессы в М-сети существенно зависят от «предыстории» автомата, причем особое влияние оказывают начальные ситуации. Было предположено, что поскольку в исходном состоянии возбуждения всех *i*-моделей сети равны нулю, «память» (затухание возбуждения) первых возбужденных *i*-моделей оказывает существенное влияние на последующий процесс переработки информации.

Пользуясь некоторыми психологическими аналогиями (влияние первого впечатления, зависимость настроения человека в течение дня от первых утренних впечатлений и настроения и т. п.), можно интерпретировать такую зависимость в М-автомате, как выработку определенного «настроения». Тогда можно говорить, что поведение и процесс переработки информации зависят не только от «характера», но и от «настроения» автомата.

Для проверки этого предположения был проведен эксперимент следующего содержания. Автомат «норма» помещался в клетку $s_1$ среды, участок которой показан на рис. 47. Задавалось направление движения — «вверх». В процессе движения автомат должен был достичь одной из клеток верхней границы среды. После окончания эксперимента по передвижению из клетки $s_1$ тот же автомат (с нулевыми начальными возбуждениями *i*-моделей) помещался в клетку $s_2$ и эксперимент повторялся.

Находясь в клетке $s_1$, автомат воспринимал ситуацию, содержащую объекты Р1, Р2 и Р3. Наличие большого количества объектов Р3 («лес») и объекта Р2 («зверь») обусловило достаточно сильное возбуждение *i*-моделей «страх» и

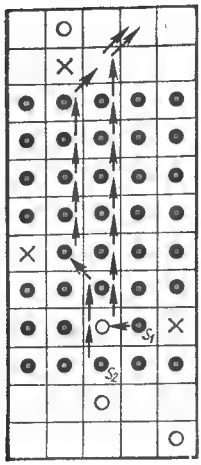



Рис. 47. Зависимость внешних реакций М-автомата «норма» от «настроения».

«опасность», которые, в свою очередь, значительно повлияли на дальнейшее состояние М-сети автомата.

Клетка $s_2$ расположена в окрестности $s_1$, однако, находясь в ней, автомат воспринимает гораздо более «положительную» ситуацию — два объекта «пища» и объекты РЗ. Этим обстоятельством объясняется преимущественное возбуждение «положительных» эмоций и, соответственно, более положительная оценка не только начальной ситуации, но и пути в целом. При движении из клетки автомат достиг цели за 14 тактов; разность суммарного возбуждения центров Пр и НПр составила — 38 *усл. ед.* на такт. При движении из клетки $s_2$ путь был пройден за 20 тактов; разность суммарного возбуждения центров Пр и НПр составила 9 *усл. ед.* на такт. Таким образом, в описанном эксперименте выявилось существенное влияние начального «настроения» на ход дальнейшей переработки информации.

**Влияние «прошлого опыта».** В обучающемся М-автомате накопление опыта происходит благодаря изменению проходимостей связей и характеристик *i*-моделей. При отсутствии этого типа обучения память в М-сети проявляется в виде затухания возбуждения *i*-моделей, так или иначе связанных с ситуациями, воспринятыми автоматом в предыдущие моменты времени. Можно полагать, что при функционировании автомата в среде общий характер последней, т. е. преимущественное содержание объектов определенного качества, формирует и характер «прошлого опыта» автомата. Подобные соображения высказывались при построении «искусственной личности Олдос» [36, 78, 79] и были подтверждены в экспе-

риментах с этой моделью. Аналогичный эксперимент был проведен и нами с автоматом «норма».

Исследовалось изменение поведения автомата в среде, содержащей участки сосредоточения определенных (положительных или отрицательных) объектов. Эксперимент проводился следующим образом.

Были заданы две среды — $S_A$ и $S_B$, каждая из которых состояла из участков $S_1$ и $S_2$ (рис. 48). В клетках участка $S_1$ расположены объекты Р1 («пища») и Р3 («лес»); в $S_2$ — Р2 («зверь») и Р3. Расположение объектов Р1 и Р2 на соответствующих участках среды задавалось одинаковым. Среда $S_A$ формировалась из последовательности участков $S_1$ и $S_2$; $S_B$ — из последовательности $S_2$ и $S_1$. В первом эксперименте автомат «норма» помещался в клетку А среды $S_A$ и задавался план передвижения, заключающийся в переходе из $S_1$ в $S_2$ (направление движения — «вверх»). Проводился машинный эксперимент. Затем автомат помещался в клетку $B$ среды $S_B$ и проводился аналогичный эксперимент по передвижению из $S_2$ в $S_1$. Внутренние реакции автомата при передвижении в среде $S_A$ показаны на рис. 49, при передвижении в $S_B$ — на рис. 50. Траектории движения автоматов показаны на рис. 48 стрелками. В обоих случаях время движения составило 14 тактов.

Сопоставление внутренних реакций автомата показало, что при «положительном» прошлом опыте автомат оказывается гораздо более «оптимистичным», чем при «отрицательном». При движении в $S_A$ и $S_B$ разность суммарного возбуждения центров Пр и НПр составила соответственно 64 и —6 *усл. ед.* на такт.

**Обсуждение результатов.** Поведение человека в естественной среде является результатом переработки не только зрительной информации, но и той, которая поступает в мозг по другим каналам. Очевидно, что чем большее число каналов

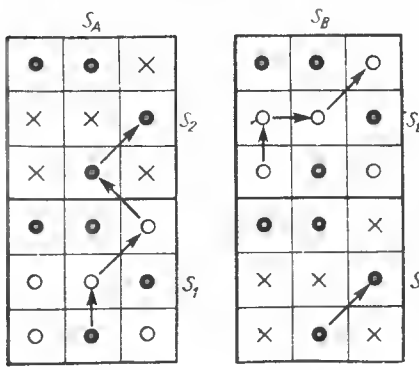



Рис. 48. Внешние реакции М-автомата «норма» в средах $S_A$ и $S_B$.

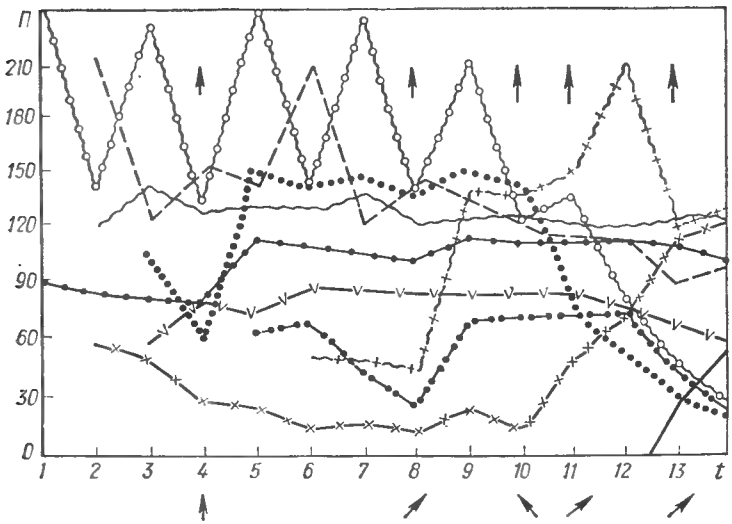



Рис. 49. Внутренние реакции М-автомата «норма» в среде $S_A$.

участвует в восприятии информации, тем выше вероятность адекватной реакции индивида. В этой связи представляется интересным исследовать поведение М-автомата, имеющего более одного канала восприятия информации, в среде, содержащей раздражители различного типа. Будем называть раздражители, соответствующие зрительным образам, т. е. конкретным объектам среды, локальными, а раздражители, соответствующие слуховым, осязательным и т. п. восприятиям,— нелокальными признаками среды. Описанные выше эксперименты являются исследованием поведения М-автомата в среде, содержащей только локальные раздражители. При этом в каждую клетку среды записывается номер соответствующей $i$-модели М-сети автомата, причем в каждой клетке может быть расположен не более чем один объект.

При наличии в среде нелокальных признаков каждая клетка может содержать любое их количество; она характеризуется не только наличием или отсутствием определенного признака, но и интенсивностью последнего. В связи с этим удобно представлять распределение в среде каждого нелокального признака путем задания отдельной к-среды (канал-среды), содержание клеток которой соответствует интенсивности данного признака. Обращение автомата к такого типа среде можно рассматривать как включение соответствующего канала информации. Естественно, что таким образом количество каналов информации в М-автомате может быть сделано сколь угодно большим; оно ограничивает-

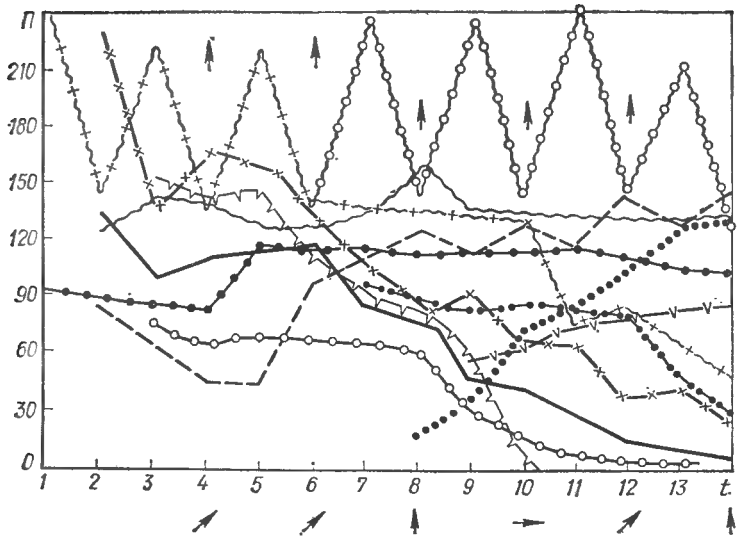



Рис. 50. Внутренние реакции М-автомата «норма» в среде $S_в$.

ся в основном возможностями семантической интерпретации и объемом памяти используемой вычислительной машины.

Рассмотренные эксперименты с автоматом РЭМ-2, естественно, не являются полным и исчерпывающим исследованием необучающихся М-автоматов. Тем не менее, некоторые важные и принципиальные вопросы в ходе этого исследования были решены. Прежде всего, оказалось, что задание рабочего режима автомата практически осуществимо. Приступая к экспериментам по передвижению автомата в среде, мы не были уверены в том, что настройка в тестовых ситуациях будет достаточной для обеспечения адекватности реакций автомата в процессе движения. Действительно, при проведении первых экспериментов с автоматом «норма» пришлось дополнительно корректировать некоторые параметры М-сети, однако эти коррекции были вызваны в основном стремлением минимизировать «удельную оценку» пути. В целом же настройка М-автомата в отдельных типичных ситуациях среды оказалась весьма эффективным способом задания «хорошей» организации М-сети.

Проведенные эксперименты еще не дают возможности сделать сколько-нибудь определенные выводы относительно величины диапазона возможных изменений различных параметров М-сети, не приводящих к нарушению целесообразности поведения. Пока можно сказать только то, что, по всей вероятности, этот диапазон достаточно велик. В противном случае нам вообще вряд ли удалось бы настроить автомат. Разумеется, этот эмпирический вывод нуждается в более кор-

ректном рассмотрении, однако в ближайшее время строгое решение вопроса о величине диапазона допустимых изменений различных параметров в такой взаимосвязанной и многопараметрической системе, как М-сеть, вряд ли будет получено. В то же время описанные результаты могут быть уже использованы в дальнейших работах по созданию более сложных М-автоматов, поскольку показывают принципиальную возможность и основные пути гибкой настройки М-автоматов на нужный тип поведения. Незначительными изменениями структуры или значений параметров отдельных элементов М-сети можно получить автоматы, существенно отличающиеся типом поведения,— «осторожные» или «решительные», «агрессивные» или «доверчивые» и т. п.

Одним из наиболее важных результатов экспериментального исследования автомата РЭМ-2 можно считать демонстрацию эффективности применения СУТ как системы, упорядочивающей процесс переработки информации. Именно СУТ обеспечивает автомату дифференциацию внутренних и внешних реакций. Содержательность этих реакций, т. е. наличие зафиксированной семантики всех, в том числе и выделяемых СУТ, *i*-моделей сети, позволяет оценивать целесообразность поведения автомата не только по его двигательным реакциям, но и по адекватности предшествующего им «хода мышления». Эксперименты с автоматом РЭМ-2 показали существенную зависимость поведения автомата от величины различных параметров его СУТ. Оказалось, что изменение типа поведения автомата может быть получено путем изменения как его структуры, так и значений отдельных параметров СУТ. Этот вывод представляется нам весьма важным, так как, во-первых, является косвенным подтверждением установленной нами аналогии между СУТ и вниманием и, во-вторых, дает дополнительные возможности коррекции поведения автомата.

Исследование автомата РЭМ-2 показало перспективность дальнейшего совершенствования и развития М-автоматов как одного из направлений создания систем ПР. Прежде всего, такое совершенствование должно быть связано с усложнением среды и введением функций самообучения и самоорганизации. Уже при проведении экспериментов с необучающимся М-автоматом (исследование влияния «прошлого опыта» и «настроения») оказалось, что некоторый эффект обучения может быть получен при использовании только механизма изменения кратковременной памяти (возбужденности *i*-моделей). Естественно, что в автомате такого типа «прошлый опыт» и «настроение» сильно взаимосвязаны и их влияние распространяется лишь на незначительный промежуток времени, зависящий от характеристик затухания соответствующих *i*-моделей сети. Однако можно полагать, что

введение в автомат алгоритмов самообучения, связанных с изменением проходимостей связей и характеристик *i*-моделей сети, позволит автомату более эффективно и адекватно использовать обучающее воздействие среды для повышения степени «разумности» своего поведения.

Заканчивая рассмотрение автомата РЭМ-2, отметим важность введения в структуру его М-сети элементов, содержательно интерпретируемых как «эмоциональные» состояния. Благодаря наличию «эмоциональной» сферы автомат способен самостоятельно оценивать воспринимаемую извне информацию и согласовывать задачу, поставленную экспериментатором, т. е. движение в среде и достижение определенной цели, с задачей «самосохранения». Это обстоятельство кажется нам чрезвычайно важным при использовании физических аналогов М-автоматов для решения практических задач в реальной среде.

## § 4. *Влияние выработанного плана на поведение автомата*

Выбранный автоматом план передвижения в среде представляет собой последовательность сложных действий, выполнение которых должно привести к достижению поставленной цели. Этапы плана представлены в структуре М-сети РЭМа-2 следующим образом. В сети автомата имеется некоторое количество *i*-моделей, каждая из которых содержательно интерпретируется как номер этапа плана. Соответствующее каждому этапу плана конкретное направление движения фиксируется связью, устанавливаемой от *i*-модели «этап плана номер...» к *i*-модели определенного действия двигательной сферы; *i*-модель элемента плана высшего уровня связывается с *i*-моделью соответствующего ему действия третьего уровня двигательной сферы; *i*-модели элементов плана низшего уровня — с *i*-моделями действий второго уровня.

При выполнении каждого этапа плана соответствующей *i*-модели приписывается определенное начальное возбуждение. При движении автомата в среде величина этого возбуждения может корректироваться в зависимости от состояния М-сети. Величина возбуждения *i*-моделей элементов плана может быть интерпретирована как «желание» автомата точно следовать выработанному плану. Коррекция возбуждения осуществляется следующим образом. В структуру «сферы желаний» М-сети автомата введена *i*-модель «выполнять план» (76), получающая возбуждение от *i*-моделей Пр (43) и «отсутствие объектов» (46) и торможение от *i*-модели НПр (44). Возбуждение *i*-модели «выполнять план» суммируется с начальным возбуждением *i*-модели выполняемого в данный

момент этапа плана (*i*-модели остальных этапов плана в это время тормозятся). Таким образом, возбуждение *i*-модели выполняемого этапа плана в каждый момент времени отражает состояние автомата и его «субъективное» отношение к плану.

Высший уровень плана соответствует общему направлению к цели, и *i*-модель этого элемента плана возбуждена в течение всего процесса передвижения автомата в среде — до момента достижения цели. *i*-Модели этапов низшего уровня плана возбуждаются при помощи специального алгоритма только на время выполнения соответствующего этапа плана. По связям от *i*-моделей этапов плана возбуждение передается к *i*-моделям действий. Поскольку между *i*-моделями действий различных уровней двигательной сферы имеются связи, направленные от высших уровней к низшим, дальнейшее распространение возбуждения в сети приводит к тому, что в распределении возбуждений на первом уровне двигательной сферы оказывается отраженным влияние различных уровней плана. Такое влияние и обусловливает целенаправленность конкретных действий автомата.

В психологическом эксперименте по построению планов двигательного поведения было замечено, что испытуемые в процессе построения плана запоминают расположение отдельных «объектов» среды и в дальнейшем используют их в качестве ориентиров при воспроизведении плана. В реальных условиях человек, как правило (сознательно или бессознательно), производит контроль результатов предпринимаемых действий и сравнение их (результатов) с предполагавшимися ранее. При этом оцениваются не только объективные результаты действия, но и изменения субъективного состояния индивида. Так, например, возможна ситуация, при которой объективный результат действия совпадает с намеченным ранее, но на выполнение этого действия затрачивается гораздо больше усилий, чем предполагалось первоначально. Общая эмоциональная оценка такого действия может оказаться отрицательной.

Поскольку контроль выполнения действий является необходимым элементом двигательного поведения человека, сделана попытка упрощенно воспроизвести этот аспект поведения в М-автомате РЭМ.

В процессе планирования, т. е. при выборе этапов плана, автомат использует только обобщенное представление о среде, отраженное в конечной *P*-поверхности второго уровня. При реализации плана — передвижения в среде — и восприятии конкретных ситуаций выполняемые автоматом действия могут отличаться от действий, предусмотренных планом. Контроль выполнения плана, т. е. обратная связь от среды к автомату и плану, осуществляется при помощи специаль-

ных следящих систем, названных нами следящими системами «по результатам» и «по чувствам».

Следящая система «по результатам» предусматривает контроль за соответствием реального положения автомата в среде ранее запланированному. Как уже отмечалось выше, при построении плана автомат использует трехуровневую внутреннюю модель среды; нижний уровень плана представляет собой последовательность переходов из одной клетки второго уровня внутренней модели в другую. Выбор конкретного плана фиксирует и определенную последовательность клеток второго уровня внутренней модели среды, через которые должен проходить реальный путь движения автомата. Эта последовательность клеток ориентиров автоматом запоминается. При выполнении плана внутренняя модель используется автоматом для определения своего места нахождения, т. е. ориентации в среде. Произведя какой-либо шаг, автомат «мысленно» передвигается и по внутренней модели среды. При этом в каждый момент времени он может определить свое положение в среде на различных уровнях внутренней модели. Эта информация и используется автоматом для сравнения с тем положением в среде, которое предусмотрено планом.

Таким образом, в процессе движения автомат производит постоянный контроль соответствия своего положения в среде ранее запланированному. В тех случаях, когда оказывается, что положение автомата не соответствует ни одной из клеток-ориентиров, сформированный план считается нарушенным и следящая система «по результатам» включает специальные аварийные программы коррекции. Действие этих программ состоит в следующем. С момента обнаружения рассогласования автомат начинает отсчет действий-шагов, продолжая движение в прежнем направлении. После выполнения определенного, заранее заданного экспериментатором, числа шагов и при условии, что за это время не достигнута ни одна из клеток-ориентиров, автомат перестает выполнять план низшего уровня и начинает движение по плану высшего уровня, т. е. по общему направлению к цели (при этом сохраняется возбуждение только $i$-модели элемента высшего уровня плана, а возбуждение $i$-моделей этапов плана низшего уровня приравнивается нулю). Если и в этом случае после выполнения заранее заданного количества шагов автомат не попадает в одну из клеток, предусмотренных планом, или не достигает цели, движение прекращается и из последней клетки план перестраивается заново. При перестройке плана могут быть использованы сформированные ранее $P$-поверхности.

Следящая система «по чувствам» в процессе движения автомата постоянно сравнивает уровень возбуждения $i$-модели

НПр с некоторым «критическим» уровнем, величина которого зависит от предполагаемого на данном этапе плана «эмоционального» состояния автомата. «Критический» уровень для каждого этапа определяется как сумма некоторой, начально задаваемой, постоянной величины (характеризующей «прошлый опыт» и «характер» автомата) и добавки, линейно зависящей от среднего уровня $P$-поверхности на соответствующем этапу участке среды. Если уровень возбуждения $i$-модели НПр превышает «критический», автомат прекращает движение и из последней клетки перестраивает план заново.

## § 5. *Взаимодействие моделей планирования и передвижения*

Предыдущие эксперименты с автоматами РЭМ-1 и РЭМ-2 были проведены на участке среды, ограниченном «полем зрения» РЭМа в режиме стратегического осмотра. В общем случае автомат помещается в среду произвольных размеров и его поведение состоит из следующих этапов: стратегического осмотра участка среды; построения плана поведения на этом участке; выполнения плана (в результате автомат оказывается на одной из границ участка); стратегического осмотра нового участка и т. д. до достижения главной цели.

Рассмотрим этот процесс более подробно на примере исследования поведения М-автомата «норма» в среде, часть которой изображена на рис. 51 (утолщенные линии показывают границы пространства, соответствующего клеткам второго уровня внутренней модели среды). Клетка среды, являющаяся главной целью автомата, отмечена буквой $F_3$. Стрелками различной величины показаны: составные действия, выбранные автоматом для достижения промежуточных целей; сложные действия (план поведения, выбираемый на каждом участке) и, наконец, выполненные автоматом конкретные действия-шаги. На рис. 51 приведены только II и III участки среды. Нижний участок (I) совпадает со средой, описанной при рассмотрении предыдущих экспериментов. В этой среде проводилось детальное исследование реакций автомата и его настройка. Не останавливаясь повторно на описании поведения автомата на участке I, отметим только, что выработанный им план поведения был выполнен: автомат достиг предусмотренной планом промежуточной цели — клетки $F_1$.

Из клетки $F_1$ — первой промежуточной цели — автомат произвел стратегический осмотр участка II и выбрал общее направление движения — «вправо — вниз». Клетка $F_2$ являлась второй промежуточной целью. В соответствии с этим

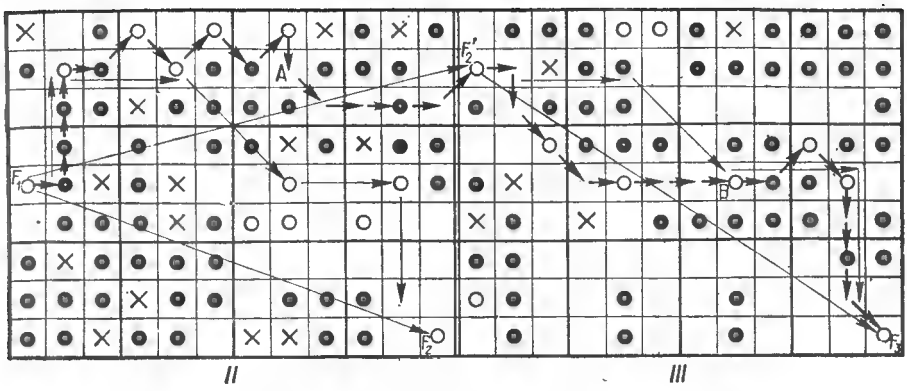



Рис. 51. Построение и выполнение планов М-автоматом РЭМ.

был построен план передвижения (последовательность сложных действий) для достижения $F_2$. Однако в процессе движения под влиянием внешних условий, выраженных в расположении объектов «пища», автомат нарушил план. В районе клетки $A$ следящая система «по результатам» зафиксировала несовпадение положения автомата с запланированным. В этих условиях автомат должен был продолжать движение в направлении последнего этапа («вправо — вниз») до достижения одной из клеток, зафиксированных в следящей системе «по результатам», или до выполнения определенного, заданного экспериментатором, количества шагов, которое характеризует «степень доверия» автомата выбранному плану. В описываемом эксперименте количество шагов было задано равным четырем. Выполнив их, автомат, однако, не вышел ни в одну из запланированных клеток. Программой автомата в таких случаях предусмотрено полное уничтожение влияния плана нижнего уровня (элементы плана не получают возбуждения) и усиление влияния плана верхнего уровня, т. е. общего направления движения. В соответствии с этим автомат продолжал движение «вправо» в течение трех шагов (количество шагов, как и в предыдущем случае, задавалось экспериментатором). После выполнения трех шагов автомат оказался в клетке $F_2'$ и из нее произвел стратегический осмотр нового участка (III) среды.

На участке III был выбран план достижения клетки $F_3$, содержащей главную цель. При передвижении в среде автоматом был опять нарушен выработанный план. Двигаясь в направлении последнего этапа, автомат вышел в клетку $B$ второго уровня, предусмотренную следящей системой «по

результатам» в качестве результатов одного из этапов плана. Как видно из рисунка, план не предусматривал перехода автомата из начальной клетки участка III сразу в клетку $B$. Однако, поскольку автомат все же попадает в нее, он начинает выполнять этап плана по передвижению из клетки $B$ в следующую запланированную. Автомат выполняет оставшиеся этапы и приходит в клетку $F_3$, содержащую главную цель.

В процессе достижения главной цели автоматом было выполнено 46 простых действий-шагов за 81 такт функционирования. При этом суммарная разность возбуждений центров Пр и НПр составила 35 *усл. ед.* на такт. На I участке среды план выполнен автоматом без значительных нарушений; на II участке автомат «сбился» с намеченного пути и вынужден был построить новый план, не достигнув промежуточной цели ($F_2$); на III участке отклонение от намеченного пути не привело к окончательному нарушению плана и автомат пришел в клетку $F_3$, содержащую главную цель.

Необходимо еще раз отметить, что структура автомата «норма» в процессе его движения в среде не изменялась. В этой связи можно говорить, что адекватность полученных на участках II и III реакций автомата свидетельствует о возможности его нормального функционирования в любой из сред выбранного класса (т. е. содержащих только объекты выбранного типа). Наличие нарушений плана на этих участках не должно рассматриваться как следствие «новизны» среды. Более того, среда была специально организована таким образом, чтобы способствовать нарушению планов. Это обстоятельство было вызвано необходимостью проверки функционирования следящих систем автомата.

Как видно из описания эксперимента, автомат РЭМ вполне успешно справляется с задачей целенаправленного передвижения в среде, содержащей «знакомые» для него объекты. Это позволяет считать, что построение физических устройств по типу необучающихся М-автоматов уже в настоящее время может оказаться эффективным для решения ряда практических задач, связанных с автономным передвижением роботов в реальных средах с ограниченным разнообразием объектов.

## М-АВТОМАТ МОД. ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Результаты экспериментального исследования описанного ранее М-автомата РЭМ-2 показали, что использование полного М-автомата в качестве системы, формирующей двигательное поведение, позволяет успешно решать задачу автоматического управления целенаправленным передвижением различного рода объектов в некотором классе сред. Мы видели также, что решение этой задачи с помощью необучающегося М-автомата, каковым является РЭМ-2, предполагает использование при его задании информации о среде, в которой автомату предстоит функционировать. При этом, чем полнее используется такая информация, тем «лучшим» оказывается поведение, формируемое необучающимся М-автоматом. В ряде случаев, однако, полная априорная информация о среде может отсутствовать. Ситуации такого рода характерны для некоторых практически важных задач автоматизации [26, 53, 59, 67]. Поэтому представляет значительный интерес изучение принципов построения таких М-автоматов, которые могли бы начинать свое функционирование на основе зафиксированной в их структуре неполной информации о среде, а затем «улучшали» бы свое поведение, используя накапливаемый ими опыт. Речь идет, таким образом, о создании М-автоматов, способных формировать адаптивное поведение.

Формирование М-автоматом адаптивного поведения связано, очевидно, с реализацией в его М-сети процессов обучения и самоорганизации. Изучение этих процессов в М-сетях и составило основное содержание работ по дальнейшему развитию модели двигательного поведения. Результатом этих работ явилось построение и экспериментальное исследование полного самообучающегося и самоорганизующегося М-автомата МОД.

В работе [5] высказано теоретическое предположение о том, что сравнительно простые операции изменения весов связей в М-сети, осуществляемые по-разному в зависимости от состояния интегрирующих центров оценочной сферы (Пр и НПр), могут обеспечить существенное увеличение эффективности работы рассматриваемых систем. Это предположение нуждалось в экспериментальной проверке по следующим основным причинам.

1. Хорошо известны работы по исследованию обучения путем изменения весов связей в системах типа персептрон [26]. Однако использовать имеющиеся здесь результаты для случая М-автоматов невозможно, поскольку рассматриваемые нами системы отличаются от персептронов следующими существенными моментами: а) М-сети содержат некоторое множество уровней, или «слоев», *i*-моделей, между которыми имеются как прямые (в направлении рецепторы — эффекторы), так и многочисленные обратные связи; это обстоятель-

ство само по себе еще не составляет принципиального отличия М-сети от персептрона, тем не менее свойства персептронов с обратными связями исследовались крайне мало; б) на работу М-сети оказывает существенное влияние система усиления — торможения (СУТ), в общем случае многоуровневая; то, что СУТ действительно изменяет ход процессов переработки информации в М-сети, было экспериментально показано ранее (см. раздел III); в) М-сеть является сетью с семантикой и в начальном состоянии организована определенным образом во всех своих сферах; г) в ходе работы М-сети возникают новые *i*-модели, роль которых в обучении весьма велика. «Растущие» персептроны также до сих пор не изучались. Перечисленные отличия не допускают прямого перенесения результатов, полученных на персептронах, на случай М-сетей, и специальное исследование свойств последних становится необходимым.

2. Известны исследования процесса обучения автоматов в средах, генерирующих сигналы типа «штраф» и «не штраф» [48, 63]. Существенным отличием рассматриваемых систем от таких автоматов является расширение набора сигналов, воспринимаемых ими от среды. Кроме того, сигнальные значения могут приобретать любые воспринимаемые М-автоматом объекты среды. Сведение сигналов среды к оценкам Пр и НПр в оценочной сфере автомата выполняется по весьма гибким и меняющимся в ходе работы автомата правилам (реализуемым изменяющейся структурой М-сети). Таким образом, интерпретация автоматом сигналов среды в «штрафы» и «не штрафы» зависит от его предыстории и не является жесткой. Это обстоятельство, а также свойства М-сети, перечисленные в п. 1, исключают возможность описания М-автоматов в терминах автоматов, минимизирующих сумму штрафов, и, следовательно, прямое перенесение на рассматриваемый случай имеющихся в этой области результатов оказывается невозможным.

3. Построение модели в виде М-автомата предполагает определенную предорганизацию ее структуры. В разделе III показано, что необучающиеся модели могут быть предорганизованы таким образом, что обеспечивают требуемое поведение. Процессы обучения в М-сети приводят к образованию новых структур, накладывающихся на структуры предорганизации и искажающих их. Соответственно изменяется и поведение модели. Было неясно, существуют ли режимы обучения, приводящие к улучшению поведения и, если существуют, то удастся ли определить области допустимых значений соответствующих параметров. Для ответа на эти вопросы также необходимо было провести экспериментальное исследование.

4. Экспериментальный характер исследования диктовался следующими соображениями. Хотя описание процессов обучения М-сети в общем виде, безусловно, предпочтительнее, однако М-сеть является «неудобным» для формализации объектом. Прежде всего, это связано с тем, что упрощение ее характеристик, неизбежное при формализации, может привести к существенному изменению ее свойств. Далее, представлялось затруднительным или мало перспективным использовать существующие в настоящее время методы формального описания объектов такого рода. Так, ряд методов, предложенных для описания процессов в сетевых структурах, применим только для регулярных (например, типа решеток) или однородных (относительно свойств элементов) сетей, в то время как М-сеть не является ни регулярной, ни однородной. Разработанные методы синтеза сетей из пороговых нейронов [21] также неудобны в нашем случае, поскольку предусматривают предварительное формально-логическое описание требуемых функций сети (а мы как раз и хотим исследовать, какие функции сеть в состоянии реализовать). Кроме того, существующие алгоритмы синтеза обеспечивают построение сетей весьма небольшого объема.

Как упоминалось выше, нашей задаче не соответствуют языки описания персептронов и автоматов с линейной тактикой. Определенные возможности имеются при использовании методов синтеза конечных автоматов [18, 19]. Здесь необходимо представление в качестве элементарных автоматов $i$-моделей и связей сети, что создает определенные трудности и обусловливает различного рода упрощения. Значительные трудности связаны с представлением в этом языке функций СУТ. Кроме того, проведению работ по формализации, требующих значительных усилий, представлялось целесообразным предпослать доказательство существования решения, которое могло быть дано экспериментальным исследованием модели сети.

Процессы в сети могут быть естественным образом описаны дифференциальными уравнениями, хотя и здесь значительные трудности связаны с представлением многоуровневой СУТ. Заранее ясно, что число уравнений в системе, описывающей достаточно сложную сеть, окажется весьма большим. Это потребует применения для решения этой системы численных методов, так что преимущества такого подхода оказываются сомнительными. Использованные нами потактовые расчеты состояния М-сети, по существу, эквивалентны численному решению некоторой системы уравнений каким-либо из шаговых методов. Отметим, что при этом сохраняется наглядность представления сети, а ее функциональные характеристики задаются без существенных упрощений.

Для проведения экспериментального исследования процессов обучения была разработана и реализована в виде программы для ЦВМ вычислительная модель М-автомата. При этом был использован тот же, что и в предыдущих случаях, общий «сюжет» двигательного поведения: МОД помещался в среду и, передвигаясь в ней, должен был выполнить заранее заданный ему план действий. Имеющиеся в среде шесть типов объектов в различной степени «опасны» или «полезны» для автомата. МОД может активно воздействовать на среду, изменяя существующее в ней расположение объектов.

## § 1. *Общая схема М-автомата*

Каждая ячейка среды, в которой находится М-автомат, может быть либо пустой, либо содержать один из раздражителей. Последние можно классифицировать по признаку их значения для автомата. Для того чтобы содержательно интерпретировать процессы, происходящие в автомате, введем условные обозначения элементов среды (табл. 6). Каждой ячейке среды приписывается пара чисел, характеризующих интенсивности заданных в среде «привлекательного» ($A$) и «непривлекательного» ($B$) запахов. Еще пара чисел, одинаковых для всех ячеек, задает интенсивность признаков «общего состояния» среды, например «светло» и «тепло». В процессе функционирования модели интенсивность этих признаков меняется в некоторой функции времени.

Автомат строит свое поведение, последовательно выполняя действия-шаги, переводящие его из одной ячейки среды в другую, соседнюю. Имеется также шаг, не изменяющий положения автомата. Таким образом, осуществление каждого шага связано с выбором одного из девяти возможных. Выбор осуществляется на основе информации о состоянии среды в окрестности автомата, т. е. на основе «восприятия ситуации», и зависит от внутреннего состояния автомата в момент выбора.

В структуру автомата введена некоторая организация в виде наличия определенного набора $i$-моделей и связей между ними.

Совокупность введенных связей задает автомату систему «безусловных рефлексов», направленных на «выживание» и «сохранение целостности», например: «избегать опасности», «приближаться к пище» и т. п. Таким образом, начальная организация автомата определяет мотивацию его поведения.

Не забывая о том, что автомат представляет собой единую М-сеть, условно выделим в нем семь основных блоков.

Таблица 6

| Условное наименование раздражителей | Графическое изображение | Группа | Отношение к автомату | Вызываемое «ощущение» | Связан с «запахом» | Примечания |
|---|---|---|---|---|---|---|
| «Зверь *A*» |  | «Зверь» | Опасно | Больно | *B* | По отношению «опасно»: $зA > зB > зC$. |
| «Зверь *B*» |  | «Зверь» | Опасно | Больно | *B* | |
| «Зверь *C*» |  | «Зверь, пища» | Опасно, полезно | Больно, вкусно | *A*, *B* | По ощущению «больно»: $зA > зB > зC$. |
| «Дерево *A*» |  | «Дерево, пища» | Полезно | Невкусно | *A* | |
| «Дерево *B*» |  | «Дерево» | Неприятно | — | — | «Запах» имеется во всех ячейках окрестности раздражителя |
| «Убежище» |  | «Убежище» | Полезно | Удобно | — | |

Схема взаимодействия блоков представлена на рис. 52. Здесь Р — блок приема информации, ПО — блок понятийных обобщений, ПС — блок памяти ситуаций, Э — блок эмоций, Ж — блок желаний, Д — блок действий и СУТ — система усиления — торможения.

Блок приема информации содержит некоторое множество *i*-моделей, каждая из которых поставлена в соответствие одному из раздражителей. Если в ячейках окрестности автомата содержатся некоторые из этих раздражителей, то соответствующие им *i*-модели возбуждаются. Между *i*-моделями раздражителей и *i*-моделями возможных шагов автомата, имеющимися в блоке Д, существуют заранее вводимые и необучаемые связи, которые образуют систему «безусловных рефлексов» автомата. Блок содержит также *i*-модели «ощущений» автомата. Так, если в занимаемой автоматом ячейке среды имеется раздражитель, одним из заданных свойств которого является свойство вызывать «боль», то соответствующая этому ощущению *i*-модель окажется возбужденной. В блоке имеются также *i*-модели, возбуждающиеся при восприятии запахов *A* и *B*, а также *i*-модели характеристик «общего состояния» среды.

В исследованном варианте автомата *i*-модели блока Р позволяют ему воспринимать: раздражители шести типов; четыре вида ощущений («больно», «вкусно», «невкусно», «удобно»); два типа запахов различной интенсивности; четыре характеристики «общего состояния» среды («тепло», «холодно», «светло», «темно») и их градации. Восприятие ситуации осуществляется автоматом в каждый момент дискретного времени. Между возбужденными *i*-моделями могут

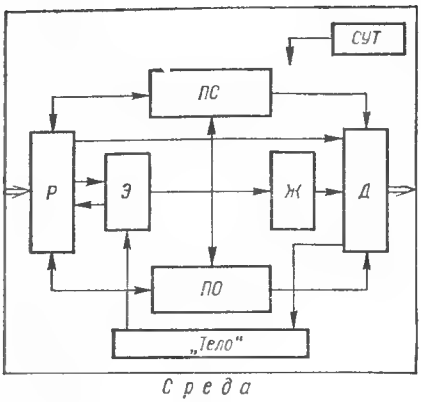



Рис. 52. Схема взаимодействия блоков М-сети автомата МОД.

возникать «ассоциативные» связи. Воспринятая в блоке Р информация передается для обработки в блоки понятийных обобщений, памяти ситуаций и эмоций.

*Блок понятийных обобщений.* Раздражители, содержащиеся в среде, могут быть объединены в различные группы и классы. Каждой из групп и классам ставятся в соответствие определенные $i$-модели. Таким образом, блок содержит $i$-модели понятий различного уровня. Исследование механизмов представления понятий и систем понятий в М-сетях составляет отдельную задачу. Для изучения этих механизмов разработана специальная модель, обсуждение которой удобно провести ниже. Поэтому будем считать пока, что некоторая начальная структура блока задана. Начальная совокупность связей между $i$-моделями понятий составляет «систему знаний» автомата. Последняя имеет иерархическую организацию. Связи, из которых она состоит, характеризуются высокой проходимостью. В процессе функционирования автомата на «систему знаний» могут накладываться «ассоциативные» связи. Между $i$-моделями понятий и $i$-моделями действий в блоке Д могут устанавливаться связи, обеспечивающие «условнорефлекторные» реакции автомата.

*Блок памяти ситуаций.* Ряд $i$-моделей этого блока в начальном состоянии не имеет содержательной интерпретации, связей друг с другом и с другими $i$-моделями («резервные» элементы). На множестве этих элементов задана закономерность «спонтанных» возбуждений. Блок содержит i-модели, относящиеся к двум уровням. $i$-Модели первого уровня сохраняют состояние возбуждения (кратковременная память) в течение $n$ моментов времени. Память $i$-моделей второго уровня составляет $kn$ единиц времени, где $k$ — целое и $k > 1$. Таким образом, если в некоторый момент времени автомат воспринимает ситуацию и одна из $i$-моделей первого

уровня оказывается возбужденной, между ней и *i*-моделями блока Р устанавливаются связи. В дальнейшем повторное восприятие той же или сходной ситуации всегда будет приводить к возбуждению этой *i*-модели, т. е. она становится представителем, моделью ситуации. Аналогичным образом та же *i*-модель связывается с *i*-моделью действия, выполненного автоматом в воспринятой ситуации. Так происходит запоминание реакции на ситуацию. В дальнейшем между *i*-моделями различных ситуаций могут устанавливаться ассоциативные связи по сходству или временной близости, так что восприятие одной ситуации может вызвать возбуждение целого ряда *i*-моделей других ситуаций.

Возбуждение *i*-моделей второго уровня происходит в $k$ раз реже, чем первого. Поэтому спонтанно возбужденная i-модель второго уровня может связаться с $k$ *i*-моделями первого и стать их представителем. Между *i*-моделями обобщенных ситуаций могут устанавливаться ассоциативные связи. Кроме того, они связываются и с элементами блока действия.

В предлагаемом варианте автомата блок содержит 150 *i*-моделей первого уровня и 50 второго. *i*-Модели блока могут связываться также с элементами блока ПО. Таким образом, совокупность связей, направленных от *i*-моделей каких-либо ситуаций к *i*-моделям блоков Р и ПО, определяет «содержание» ситуаций, а их связи с блоком эмоций — «значение» ситуаций для автомата.

*Блок эмоций* содержит 14 *i*-моделей различных эмоциональных состояний и чувств (недовольство, гнев, беспокойство, страх, удовлетворение, неудовлетворение, любопытство, неуверенность, уверенность, безопасность, радость, близость цели, голод, усталость). Кроме того, в блок входят *i*-модели интегральных оценок «приятно» (Пр) и «неприятно» (НПр). Между некоторыми *i*-моделями блока заданы связи, отражающие наблюдающиеся у животных и человека взаимодействия между эмоциональными состояниями [32]. Например, возбуждение *i*-модели «гнев» тормозит возбуждение *i*-модели «усталость». Заданы также некоторые «врожденные» связи с *i*-моделями блока Р. Таким образом, восприятие ситуации изменяет состояние эмоциональной сферы автомата.

Связи, устанавливающиеся в процессе функционирования автомата между элементами блока эмоций и блоков ПС и ПО, обеспечивают влияние эмоционального состояния на весь ход переработки информации и, следовательно, выбор автоматом действий. В свою очередь, остальные блоки влияют на состояние блока эмоций.

Возбуждение *i*-моделей «голод» и «усталость» отражает состояние «тела» автомата. Возбуждение *i*-модели «голод» дискретно увеличивается в каждый момент времени, но снижается до нуля, если автомат находится в клетке, содержа-

щей раздражитель группы «пища», и выполняет действие «есть». Возбуждение *i*-модели «усталость» дискретно увеличивается при каждом шаге автомата, но снижается до нуля при выполнении им действия «спать». Элементы блока эмоций связаны с *i*-моделями блока желаний.

*Блоки желаний и действий.* «Желание» мы рассматриваем как обобщенное, недифференцированное действие. В соответствии с этим в автомат включены *i*-модели желаний «действовать» и «не действовать», а также их уточнения — *i*-модели желаний «действовать быстро», «действовать спокойно», «стоять на месте» и «отдыхать». Возбуждение *i*-моделей желаний обусловливается состоянием элементов блока эмоций и передается непосредственно на *i*-модели действий.

Блок действий включает в себя *i*-модели 22 действий, доступных автомату. Среди них имеется 9 *i*-моделей шагов, переводящих автомат в одну из клеток окрестности. Кроме того, имеется 8 *i*-моделей действий-шагов «нападать». Действие «нападать» связано с переходом автомата в новую ячейку. При этом, если, например, раздражитель «зверь *A*» по условиям «опасен» для системы, то при обычном шаге автомат не должен входить в ячейку, занятую этим раздражителем, и такой шаг рассматривается как ошибка, свидетельствующая о неверном выборе структуры или алгоритмов обучения. Если же этот шаг выполняется как действие «нападать», то указанное ограничение снимается. «Нападение» связано с увеличением возбуждения *i*-моделей «усталость» и «больно». В блоке имеются также *i*-модели следующих действий: 1) рыть; при выполнении этого действия в некоторой ячейке в последнюю вносится раздражитель «убежище», *i*-модель которого связана с *i*-моделями «удобно», «не действовать» и т. п.; 2) спать; при выполнении этого действия возбуждение *i*-модели «усталость» снижается до нуля и возбуждается «удовлетворение»; 3) есть; снижается до нуля возбуждение «голода» и повышается «удовлетворение»; 4) нести; после выполнения этого действия в какой-либо непустой ячейке дальнейшее перемещение автомата в среде сопровождается соответствующим перемещением находившегося в исходной ячейке раздражителя, а также повышением возбуждения *i*-модели «усталость»; 5) бросить; прекращает действие «нести».

Кроме указанных, блок содержит также восемь *i*-моделей «обобщенных» действий, каждая из которых связана с *i*-моделями шагов, при помощи которых соответствующее «обобщенное» действие может быть реализовано, и с *i*-моделями обобщенных ситуаций в блоке ПС (связи с блоком ПС устанавливаются в ходе функционирования автомата). Состояние блока действий является результатом переработки информации во всей сети. Выбор одного из возможных дейст-

вий осуществляется по определенным правилам, которые будут описаны ниже.

*Система усиления — торможения.* В предлагаемом автомате СУТ реализована в виде двухуровневой системы. Ее первый уровень составляют «частные» подсистемы, каждая из которых действует на $i$-моделях одного из блоков автомата. Будем обозначать их, приписывая к слову СУТ название соответствующего блока (СУТж, СУТпо и т. п.). Второй уровень СУТ (СУТ-2) представлен в виде подсистемы, в каждый момент времени выбирающей наиболее возбужденный блок автомата. $i$-Модели всех остальных блоков равномерно притормаживаются (в том числе и $i$-модели, выбранные «частными» СУТ этих блоков). Возбужденность всех $i$-моделей выбранного СУТ-2 блока увеличивается.

## § 2. *Динамика М-автомата*

Пусть в некоторый момент времени в М-сети возбуждено определенное количество $i$-моделей, и пусть шаг был выполнен автоматом в предыдущий момент. Работа автомата начинается с восприятия ситуации, что приводит к возбуждению ряда $i$-моделей блока Р. Затем происходит очередной пересчет М-сети, при котором определяются новые значения проходимостей связей и возбужденностей $i$-моделей. При этом спонтанно возбужденная $i$-модель в блоке ПС связывается с возбужденными $i$-моделями блока Р. После определения возбужденностей $i$-моделей начинает работать СУТ, в результате чего картина возбуждений изменяется. По измененным возбужденностям проверяется, будут ли выполняться условия действия и, если они не выполняются, повторяется восприятие ситуации и цикл выполняется вновь.

В ходе пересчетов возбуждение, возникающее в блоке Р, распространяется по всей сети. При этом одновременно с формированием $i$-моделей ситуаций в блоке ПС идет «узнавание» воспринятых раздражителей в блоке ПО и формируется эмоциональная оценка в блоке Э. Затем возбуждение достигает блока Д, причем отдельные его $i$-модели возбуждаются неодинаково. Это обстоятельство используется для выбора действия. Определенное действие осуществляется при выполнении одного из следующих условий: 1) СУТ-2 выбирает блок Д; при этом выполняется действие, $i$-модель которого выбрана СУТд; 2) СУТ-2 выбирает не блок Д, но возбужденность $i$-модели, выбранной СУТд, превышает некоторый заранее выбранный уровень. Если выполняется одно из этих условий и СУТж выделяет $i$-модель «действовать быстро», то в результате шага автомат перемещается не в

одну из соседних клеток, а дальше — в клетку следующего слоя. За выполнением действия следует восприятие новой ситуации и описанные выше циклы повторяются. Блок действий включает в себя также системы, следящие за выполнением плана, которые позволяют автомату корректировать план или отказываться от его выполнения.

Уточним понятие «ход мышления» автомата. В каждый момент времени СУТ выделяет *i*-модели в различных сферах М-сети. То обстоятельство, что М-сеть является сетью с семантикой, позволяет каждой из выбранных СУТ *i*-моделей поставить в соответствие определенное слово естественного языка. В ходе работы М-автомата СУТ последовательно выделит некоторый ряд *i*-моделей. Последовательность слов, соответствующих выделяемым СУТ *i*-моделям, мы и будем называть «ходом мышления» автомата.

МОД рассчитан на совместную работу с системой, моделирующей переработку информации в процессе построения плана двигательного поведения. Для этого М-автомат дополняется блоком, обеспечивающим влияние выработанного плана на выбор действий. Последний включает в себя системы, следящие за выполнением плана и позволяющие автомату корректировать план или отказаться от его выполнения.

Необходимо еще раз отметить, что содержательные обозначения элементов среды и *i*-моделей автомата выбраны, вообще говоря, произвольно для того, чтобы сделать возможной содержательную интерпретацию процессов, происходящих в автомате, и облегчить оценку адекватности его поведения. Будем по возможности и в дальнейшем придерживаться этих обозначений.

## § 3. *Реализация М-автомата*

М-автомат МОД реализован в виде комплекса программ для ЦВМ БЭСМ-6. В настоящем параграфе описываются наиболее важные участки программы, а также блок-схемы, необходимые для понимания ее структуры.

При реализации М-автомата на его структуру и алгоритмы наложен ряд ограничений. Некоторые из них связаны с выбором конкретного вида характеристик *i*-моделей и связей. Эти ограничения зафиксированы в виде совокупности условий и неравенств, приведенных ниже. Часть ограничений вводится путем включения в алгоритм функционирования М-сети ряда вспомогательных процедур, краткое описание которых также дано в настоящем параграфе. Существенное ограничение, далее, состоит в том, что мы будем считать пренебрежимо малыми значения остаточных составляющих усиливающей и тормозной компонент связей,

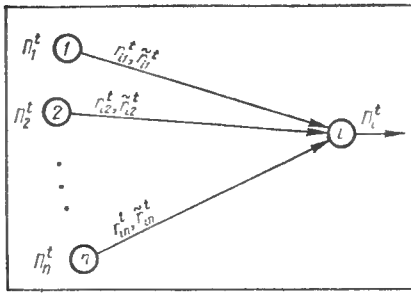


Рис. 53. Связи между $i$-моделями.

т. е. всегда $r_{[0]ij} \approx \tilde{r}_{[0]ij} \approx 0$ (см. гл. 4). Введение этого ограничения обусловлено тем обстоятельством, что объем затрат машинного времени при экспериментальном исследовании модели двигательного поведения не позволяет исследовать работу М-сети в течение столь больших промежутков времени, чтобы изменения этих составляющих можно было считать существенными. С тем же обстоятельством связан и отказ от реализации в программе характеристик гипертрофии и адаптации возбудимости $i$-моделей. Таким образом, в рамках настоящей работы мы не будем исследовать упомянутые механизмы долговременной памяти М-сети.

**Характеристики элементов М-сети.** Основные характеристики $i$-моделей и связей между ними реализованы следующим образом.

*Характеристика передачи связей* принята линейной, т. е. для случая, показанного на рис. 53,

$$E_i = \sum_{j=1}^{n} \Pi_j \cdot r_{ij}, \quad \tilde{E}_i = \sum_{j=1}^{n} \Pi_j \cdot \tilde{r}_{ij}. \tag{8.1}$$

*Характеристика затухания* $i$-моделей имеет вид

$$_{z}\Pi_i^t = \Pi_i^{t-1} \cdot \alpha_i, \tag{8.2}$$

где $\alpha_i$ — коэффициент затухания $i$-й $i$-модели, $0 \leqslant \alpha_i < 1$; $\Pi_i^t$ — возбужденность $i$-й $i$-модели при условии $E_i^t = \tilde{E}_i^t = 0$.

*Характеристика возбуждения* $i$-моделей принята логарифмической и для $i$-й $i$-модели

$$_{v}\Pi_i^t = K_i^t \cdot \ln (E_i^t), \tag{8.3}$$

где $K_i^t$ — коэффициент пропорциональности; $_{v}\Pi_i^t$ — возбужденность $i$-й $i$-модели при условии $\Pi_i^t = 0$, $\tilde{E}_i^t = 0$.

*Характеристика торможения* $i$-моделей принята линейной, так что

$$K_i^t = K_{ni} - m\tilde{E}_i^t, \tag{8.4}$$

где $K_{ni}$ — «начальное» значение $K_i$, $K_{ni} = \text{const}$; $m$ — коэффициент пропорциональности.

Каждая $i$-модель характеризуется порогом возбуждения $\Theta_i$.

При определении величин возбуждений $i$-моделей сети в момент $t+1$ величины ${}_v\Pi_i^t$ и ${}_z\Pi_i^t$ нелинейно суммируются, так что в общем виде

$$\Pi_i^t = P = (K_{ni} - m\tilde{E}_i^t) \ln (e^{\frac{\Pi_i^{t-1}\alpha_i}{K_{ni}}} + E_i^t - \Theta_i). \tag{8.5}$$

Основываясь на нейрофизиологической аналогии (существование «верхнего порога» возбуждения нейрона), примем, что величина возбуждения $i$-моделей ограничена сверху некоторым постоянным, задаваемым заранее значением $\Pi_{max}$. С целью экономии затрат машинного времени будем считать пренебрежимо малыми те возбуждения, величина которых не превосходит некоторого постоянного задаваемого заранее значения $\Pi_{min}$. Таким образом,

$$\Pi_i^{t+1} = \begin{cases} \Pi_{max} & \text{при } P > \Pi_{max}, \\ P & \text{при } \Pi_{min} \leqslant P \leqslant \Pi_{max}, \\ 0 & \text{при } P < \Pi_{min}. \end{cases} \tag{8.6}$$

Процесс определения возбужденности всех $i$-моделей сети с помощью формулы (8.5) будем называть пересчетом сети, а соответствующий алгоритм — алгоритмом пересчета.

Как упоминалось выше, характеристика проторения связей (4.2) может иметь различный вид для связей проторенных и непроторенных (точнее, проторяемых впервые). В исходном состоянии М-сети между отдельными $i$-моделями существуют заранее заданные связи, имеющие некоторую проходимость. Будем полагать, что между всеми остальными $i$-моделями также имеются связи, начальная проходимость которых равна нулю. При выполнении определенных условий эти связи могут проторяться. Процесс их проторения естественно называть установлением связей, а соответствующий алгоритм — алгоритмом установления.

Алгоритм установления связей между $i$-й и $j$-й $i$-моделями работает в том случае, если выполняется условие установления, т. е. является истинным выражение

$$(\Pi_i^t \geqslant \Pi_u) \wedge (\Pi_j^t \geqslant \Pi_u), \tag{8.7}$$

где $\Pi_u$ — задаваемый заранее порог.

Введем обозначение: $\Delta^t = \Pi^t_{\text{Пр}} - \Pi^t_{\text{НПр}}$. Пусть в момент $t$ для $i$-моделей $i$ и $j$ выполнено условие (8.7), а также $r_{ij} = 0$ и $\tilde{r}_{ij} = 0$. Алгоритм установления реализует функцию (4.2), заданную в виде

$$r^t_{ij} = k_0 (\Pi^t_i + \Pi^t_j) + k_1 \Delta^t, \tag{8.8а}$$

$$\tilde{r}^t_{ij} = \tilde{k}_0 (\Pi^t_i + \Pi^t_j) - \tilde{k}_1 \Delta^t, \tag{8.8б}$$

где $k_0$, $k_1$, $\tilde{k}_0$, $\tilde{k}_1$ — масштабные коэффициенты.

Если значение $r^t_{ij}\left(\tilde{r}^t_{ij}\right)$ оказывается меньше нуля, то оно принимается равным нулю, т. е. всегда $r^t_{ij} \geqslant 0$ и $\tilde{r}^t_{ij} \geqslant 0$.

*Характеристика затухания связи* задается следующими соотношениями:

$${}_z r^{t+1}_{ij} = \beta r^t_{ij}, \qquad 0 < \beta \leqslant 1, \tag{8.9а}$$

$${}_z \tilde{r}^{t+1}_{ij} = \tilde{\beta}\, \tilde{r}^t_{ij}, \qquad 0 < \tilde{\beta} \leqslant 1, \tag{8.9б}$$

где ${}_z r^{t+1}_{ij}$ и ${}_z \tilde{r}^{t+1}_{ij}$ — «затухшие» значения компонент $r^t_{ij}$ и $\tilde{r}^t_{ij}$.

Если в момент $t$ некоторая связь $R^t_{ij} \neq 0$, то характеристика проторения этой связи задается в виде

$$r^{t+1}_{ij} = {}_z r^t_{ij} + k_2 r^t_{ij} (\Pi^t_i + \Pi^t_j) \Delta^t, \tag{8.10а}$$

$$\tilde{r}^{t+1}_{ij} = {}_z \tilde{r}^t_{ij} - \tilde{k}_2 \tilde{r}^t_{ij} (\Pi^t_i + \Pi^t_j) \Delta^t, \tag{8.10б}$$

где $k_2$, $\tilde{k}_2$ — коэффициенты пропорциональности.

**Алгоритмы функционирования М-автомата.** Для удобства дальнейшего изложения введем обозначения и дадим краткое описание основных подблоков алгоритма $A$.

$A_c$ — *алгоритм пересчета,* реализующий функции (8.5).

$A_R$ — *алгоритм установления связей,* реализующий функции (8.8) при выполнении условия (8.7).

$A_P$ — *алгоритм проторения связей,* реализующий функции (8.10).

$A_{\text{СУТ}}$ — *алгоритм, реализующий функции системы усиления — торможения.*

$A_g$ — *алгоритм, вычисляющий функцию цели.* Пусть в момент $t$ М-автомат находится в вершине $g_i$ среды и задана «целевая» вершина $g_{\text{ц}}$. Входной информацией для $A_g$ являются сведения о $g_i$ и $g_{\text{ц}}$. В результате работы $A_g$ дополнительное возбуждение получает $i$-модель того сложного действия, выполнение которого необходимо для передвижения автомата из $g_i$ в $g_{\text{ц}}$. Таким образом, алгоритм $A_g$ отображает в сферу действий автомата его положение относительно цели, реализуя «функцию цели» $g(g_i, g_{\text{ц}})$.

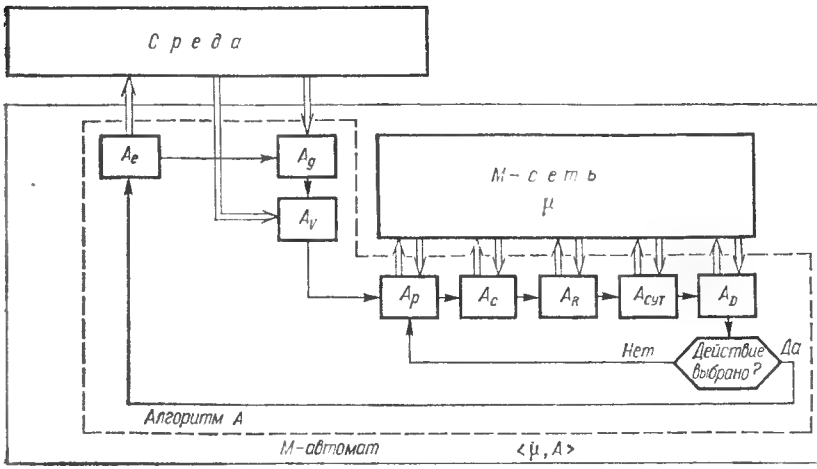



Рис. 54. Обобщенная блок-схема алгоритма функционирования М-автомата.

*$A_V$ — алгоритм восприятия.* Входной информацией для $A_V$ являются сведения о среде Р и местоположении автомата в данный момент. В результате работы $A_V$ оказываются возбужденными до величины $\Pi_V$ *i*-модели раздражителей, находящихся в окрестности автомата. Совокупность возбужденных *i*-моделей соотнесем воспринятой ситуации $S_t$. Таким образом, алгоритм восприятия осуществляет отображение в сферу восприятия М-автомата ситуации, в которой последний находится.

*$A_D$ — алгоритм выбора действия.* На вход $A_D$ подается информация о распределении возбуждений в сфере действий М-сети и зафиксированные правила выбора действия. Используя эти правила, $A_D$ либо выбирает некоторую *i*-модель действия, либо не выбирает никакой *i*-модели. Таким образом, действия могут осуществляться автоматом не на каждом такте его работы.

*$A_e$ — множество «эффекторных» алгоритмов.* Каждому действию $d_i \in D$ соответствует единственный «эффекторный» алгоритм $A_{e_i} \in A_e$. После выбора алгоритмом $A_D$ *i*-модели некоторого действия начинает работать соответствующий этому действию алгоритм $A_{e_i}$, который в зависимости от вида действия может или изменить положение автомата в среде, или изменить расположение объектов, или сделать и то и другое.

Обобщенная блок-схема алгоритма $A$ представлена на рис. 54, где двойные стрелки указывают направления обмена информацией между блоками системы.

Уточним понятие такта работы М-автомата. Будем полагать, что один такт составляют все операции, выполняемые между двумя последовательными вхождениями в блок $A_D$. Из рис. 70 видно, что в зависимости от результатов работы $A_D$ в такт может не включаться выполнение алгоритмов $A_e$, $A_V$, $A_g$.

Кроме указанных на рис. 54, в программу введен ряд вспомогательных алгоритмов, выполняющих некоторые функции, выражение которых в языке М-сети оказывается неудобным с точки зрения машинной реализации. Опишем наиболее важные из этих функций.

*Асимметрия связей* $R_{ij}$ и $R_{ji}$ вводится для того, чтобы обеспечить М-автомату возможность воспроизведения последовательностей. Пусть в момент $t$ $i$-модели $i$ и $j$ возбуждены до $\Pi_i^t$ и $\Pi_j^t$ соответственно и $\Pi_j^t > \Pi_i^t$. Для операций установления (8.8) и проторения (8.10) связей принято:
если $\Pi_i^t < \Pi_j^t$, то

$$r_{ij}^t := r_{ij}^t + a_s(\Pi_j^t - \Pi_i^t) \tag{8.11а}$$

и

$$\tilde{r}_{ij}^t := \tilde{r}_{ij}^t + a_s(\Pi_j^t - \Pi_i^t), \tag{8.11б}$$

здесь $a_s$ — коэффициент асимметрии.

Очевидно, что при установлении или проторении связи $R_{jl}^t$ справедливо $\Pi_j^t > \Pi_l^t$, и операции (8.11) над $R_{jl}^t$ не выполняются. Получаем, таким образом, $R_{ij}^t > R_{jl}^t$.

Пусть в момент $t$ М-автоматом воспринят некоторый образ и соответствующая ему $i$-модель $k$ возбуждена до определенного значения $\Pi_V : \Pi_k^t = \Pi_V$. Пусть в момент $t+1$ воспринят другой образ и $\Pi_l^{t+1} = \Pi_V$. В соответствии с (8.5) в момент $t+1$ получим $\Pi_k^t < \Pi_k^{t+1}$, и установившиеся между $k$ и $l$ связи окажутся асимметричными: $R_{kl}^{t+1} > R_{lk}^{t+1}$.

Пусть в моменты $t$, $t+1$, $t+2, \ldots, t+n$ М-автомат воспринимает последовательность из $n+1$ неповторяющихся образов. При этом (в соответствии с (8.8) и (8.11)) в М-сети сформируется структура, показанная на рис. 55, *а*, где толщина линий пропорциональна проходимости изображаемых ими связей. Если через некоторое время после момента $t+n$ окажется возбужденной $i$-модель $l$ так, что она будет выделена СУТ, то в результате пересчета будут возбуждены $i$-модели $k$ и $m$, причем $\Pi_m > \Pi_k$, и $i$-модель $m$ окажется выделенной СУТ. Далее процесс повторится и будет продолжаться до тех пор, пока СУТ не выделит все следующие за $l$ $i$-модели последовательности в том порядке, в котором предъявлялись соответствующие образы («воспроизведет» последовательность). Правильный порядок воспроизведения

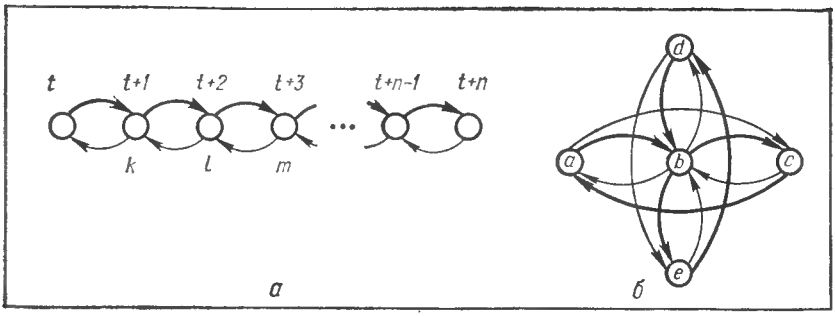



Рис. 55. Отображение временных последовательностей в структуре связей.

может быть нарушен, если некоторые $i$-модели последовательности получают возбуждение от других $i$-моделей сети (например, от $i$-моделей сферы оценок — если предъявлялись «эмоционально значимые» образы). Этот феномен лежит в основе формирования «редуцированных» последовательностей, включающих в себя лишь наиболее важные, «ключевые» образы и понятия [7].

Описанный механизм обеспечивает также правильное воспроизведение «пересекающихся», т. е. имеющих общие элементы, последовательностей. Такая возможность обусловлена тем, что характеристика затухания (8.2) $i$-моделей в общем случае обеспечивает отличную от нуля возбужденность $i$-модели в течение $n (n > 1)$ тактов с момента ее первоначального возбуждения, так что при предъявлении некоторой последовательности первая из возбужденных $i$-моделей связывается не только со второй, но и с рядом последующих $i$-моделей, причем $R_{1,2} > R_{1,3} > \ldots > R_{1,n}$. Очевидно, $n = f(\alpha)$ и $R_{1,j} = r(\alpha, \Pi_V)$, что в неявном виде задается характеристиками (8.8), (8.9) и (8.10), (8.11).

Поясним сказанное простым примером. Пусть в моменты $t, t+1, t+2$ М-автомату предъявляется последовательность образов $(a, b, c)$, а в моменты $\tau+1, \tau+2, \tau+3$ $(\tau \gg t)$ — последовательность $(d, b, e)$. После предъявления обеих последовательностей в М-сети сформируется структура, изображенная на рис. 55, *б*, где, как и раньше, толщина линий пропорциональна проходимости соответствующих связей. Пусть в момент $T (T \gg \tau)$ получила некоторое возбуждение $i$-модель $a$. В результате пересчета возбудятся $i$-модели $b$ и $c$, но, поскольку $R_{ab} > R_{ac}$, то $\Pi_b^{T+1} > \Pi_c^{T+1}$ и СУТ выделит $i$-модель $b$. В момент $T+2$ окажутся возбужденными $i$-модели $c$ и $e$, но, поскольку $c$ еще сохраняет возбуждение, полученное в предыдущем такте, т. е. «предвозбуждена», то

$\Pi_c^{T+2} > \Pi_e^{T+2}$. СУТ выделяет $i$-модель $c$, и последовательность $(a, b, c)$ оказывается воспроизведенной правильно.

Подробный анализ процессов воспроизведения последовательностей М-автоматом является темой отдельного исследования [61]. Операции (8.11) реализуются специальным алгоритмом $B_{as}$.

$B_{ud}$ — *алгоритм ускорения действий* — задает М-автомату «установку» на выполнение действий, повышает его «двигательную активность». Из описания работы автомата, приведенного в § 2 настоящей главы, можно заключить, что возможны такие режимы его функционирования (определяемые совокупностью воспринятых ситуаций, состоянием сферы оценок и т. п.), при которых в течение длительного времени не выполняются условия действия. В свободной интерпретации это означает, что автомат «слишком долго думает» перед выбором шага. Такие режимы представляют определенный интерес, так как дают материал для изучения и оценки рациональности «хода мышления» автомата. В связи с этим, однако, существенно возрастают затраты машинного времени, что затрудняет исследование собственно двигательного поведения. Следовательно, целесообразно ввести алгоритм, ускоряющий выбор действия в необходимых случаях.

Алгоритм выполняет следующие операции: 1) сравнивает ситуацию, существующую в блоке восприятия в момент $t$, с ситуацией, существовавшей в момент $t-1$; 2) определяет меру совпадения $m_s$ обеих ситуаций так, что $0 \leqslant m_s \leqslant 9$. При полном совпадении ситуаций $m_s = 9$, при полном несовпадении — $m_s = 0$; 3) увеличивает возбужденность $i$-модели «желание действовать» ($\Pi_{jd}$) на величину $\Delta_{jd}$:

$$\Pi_{jd}^t := \Pi_{jd}^t + \Delta_{jd} = \Pi_{jd} + m_s\Pi_d, \tag{8.12}$$

где $\Pi_d$ — максимально возможная добавка ($\Pi_d = \text{const}$); 4) запоминает ситуацию, существующую в блоке восприятия в момент $t$. Действие алгоритма сводится, таким образом, к следующему. Если в течение нескольких тактов М-автомат не совершает действий и, следовательно, воспринимаемая им ситуация не меняется, то возрастает величина возбуждения $\Pi_{jd}$. Это приводит к увеличению возбуждения $i$-модели действий, что, в свою очередь, приближает момент выполнения условий действия. Аналогичный процесс происходит и в тех случаях, когда выполнение действия не ведет к изменению ситуации, что возможно в средах с регулярным расположением раздражителей.

$B_{sit}$ — *алгоритм формирования i-моделей ситуаций* — обеспечивает установление адекватных связей между $i$-моделями раздражителей, составляющих воспринимаемую в момент $t$ ситуацию, и одной из «резервных» $i$-моделей.

В момент (такт) восприятия ситуации описываемый алгоритм определяет свободную (не связанную с другими) $i$-модель первого уровня блока памяти ситуаций и приписывает ей определенную, задаваемую заранее возбужденность $П_{sit}$. Далее, при работе блока установления связей $A_R$ между этой $i$-моделью и $i$-моделями раздражителей устанавливаются необходимые связи. В случае, если резерв свободных $i$-моделей исчерпан, алгоритм определяет среди $i$-моделей первого уровня блока памяти ситуаций такую $i$-модель, которая наиболее слабо связана с остальными, уничтожает все направленные к ней и от нее связи (устанавливая нулевое значение их проходимости) и приписывает ей возбужденность $П_{sit}$. Через каждые $k$ ($k > 1$ и заранее задано) тактов аналогичные операции выполняются для $i$-моделей второго уровня блока памяти ситуаций.

$B_0$ — *алгоритм задержанного обучения* — обеспечивает установление адекватных связей между $i$-моделями ситуаций и действий. Пусть в момент $t$ М-автомат находится в некоторой ситуации $S_t$ и выполняет шаг, переводящий его в другую ситуацию. В этот момент в М-сети автомата имеется $i$-модель, соответствующая ситуации $S_t$. Обозначим номер этой $i$-модели *nsit*. Номер $i$-модели шага, выполненного в момент $t$, обозначим *ngou*. В момент $t + 1$ описываемый алгоритм, используя запомненные значения *nsit* и *ngou*, увеличит возбужденность соответствующих $i$-моделей на некоторую постоянную заранее заданную величину. В результате по формулам (8.8) будет установлена связь $R_{ngou,\ nsit}$. При этом, если воспринятая в момент $t + 1$ новая ситуация содержит фактор наказания (поощрения), то тормозный (усиливающий) компонент связи $R_{ngou,\ nsit}$ будет преобладающим. Таким образом, в М-сети окажется зафиксированной информация о том, что «в ситуации типа *nsit* не следует (следует) выполнять шаг *ngou*».

В ряде случаев, однако, новая ситуация может не содержать факторов реакции, тогда ее «эмоциональная оценка» вырабатывается с задержкой в ходе пересчетов сети. Пусть в момент $t$ выполнен шаг *ngou*, а следующий шаг выполняется в момент $t + n$, причем $n > 1$. В этом случае в момент $t + 1$ будет установлена связь $R_{ngou,\ nsit}$, проходимости которой отражают текущее состояние центров Пр и НПр. Последнее запоминается, и в течение последующих тактов производится сравнение значений параметра $\Delta^{t+k}$ при $k = 2, 3, \ldots, n$ со значением $\Delta^{t+1}$. Если абсолютное значение разности $\Delta^{t+k} - \Delta^{t+1}$ превосходит в некоторый момент $t + k$ ($1 < k < n$) заранее задаваемый порог, то, в зависимости от знака разности, изменяется значение тормозного или усиливающего компонента связи $R_{ngou,\ nsit}$. После выполнения

в момент $t+n$ следующего шага описанные процессы повторяются.

*$B_{vs}$ — алгоритм ограничения количества связей* — введен с целью уменьшения машинного времени счета программы.

В связи с ограниченной емкостью ОЗУ существует ограничение и на количество связей между $i$-моделями сети, так что М-сеть не может содержать более чем $s_m$ связей.

В то же время очевидно, что чем меньше проходимости $r_{ij}$ и $\tilde{r}_{ij}$ связи $R_{ij}$, тем меньшее влияние оказывает $R_{ij}$ на функционирование М-сети. Поэтому представляется целесообразным введение числовой переменной *gvs* с тем, чтобы при выполнении условий $r_{ij}^t < gvs$ и $\tilde{r}_{ij}^t < gvs$ описываемый алгоритм исключал связь $R_{ij}^t$ из рассмотрения, т. е. выполнял операцию $R_{ij}^t := 0$.

Алгоритм построен так, что количество связей М-сети в любой момент времени $(s_m^t)$ не превышает максимально допустимого $(s_m)$. Для этого в начале каждого такта величина *gvs* вычисляется следующим образом:

$$gvs^t := gvs^{t-1} + k_V \frac{1}{s_m - s_m^{t-1}}, \tag{8.13}$$

где $k_V$ — масштабный коэффициент.

Таким образом, при увеличении числа связей в М-сети в первую очередь будут исключаться из рассмотрения связи с наименьшей проходимостью.

*$B_R$ — алгоритм рандомизации возбуждений* — вводит случайный компонент в распределение возбуждений М-сети. Содержательно такой компонент отражает влияние на функционирование модели факторов, не учтенных при моделировании. На каждом такте работы М-автомата алгоритм формирует последовательность (длиной меньше или много меньше числа $i$-моделей сети) случайных чисел, с помощью которых вычисляется количество случайно возбуждаемых $i$-моделей, их номера $(R_i)$ и величина добавочного возбуждения $(R\Pi)$. Далее для каждой из возбуждаемых $i$-моделей выполняется операция

$$\Pi_{Ri}^t := \Pi_{Ri}^t + R\Pi. \tag{8.14}$$

В алгоритме испольвован стандартный датчик случайных чисел $\xi(0 < \xi < 1)$ с равномерным законом распределения.

*$B_z$ — алгоритм формирования реакций среды в «особых» ситуациях* — введен с целью создания условий, удобных для исследования некоторых процессов обучения М-автомата. Используется при работе автомата в простых средах. Особой является такая ситуация, в которой одно (произвольно выбираемое экспериментатором) действие из множества воз-

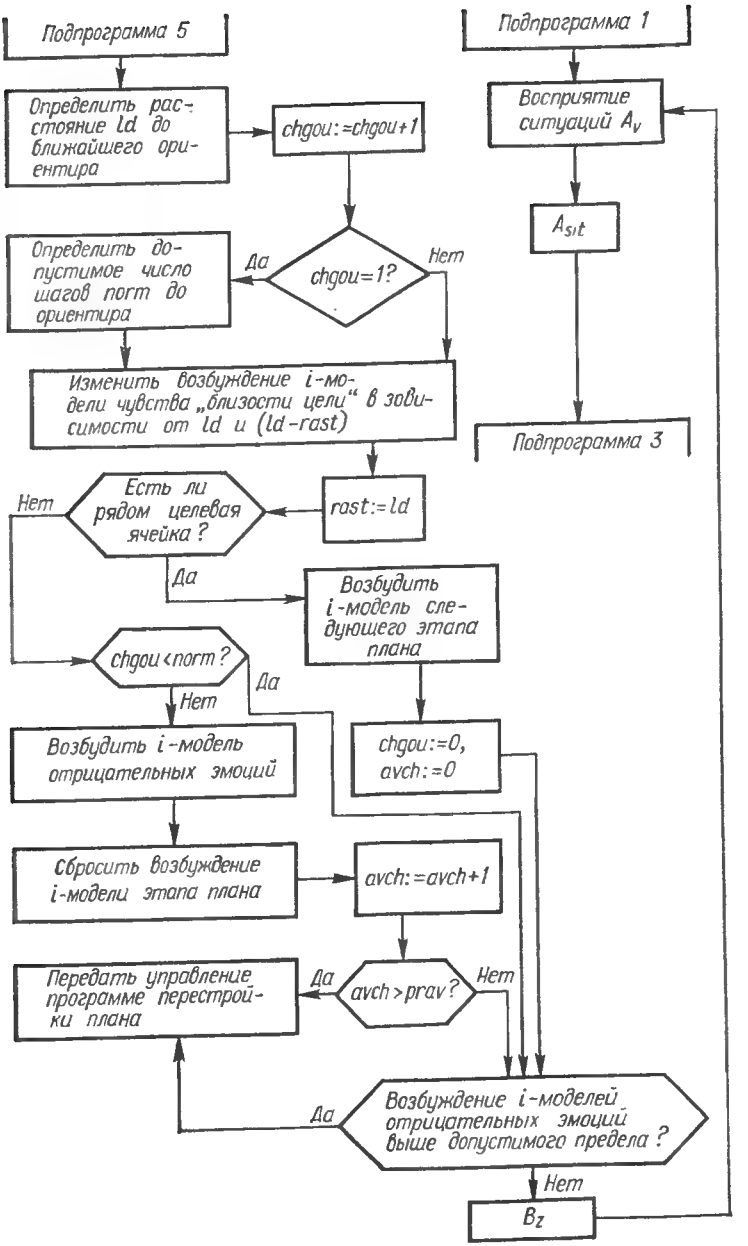



Рис. 56. Обобщенная блок-схема подпрограммы 2 (восприятие и взаимодействие с планом).

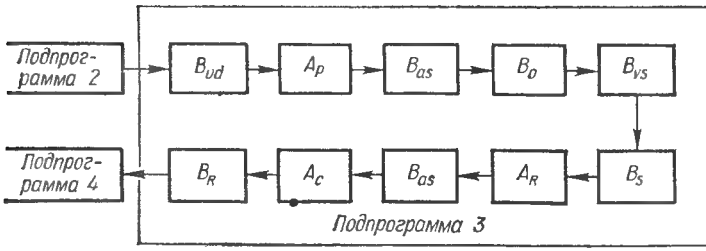



Рис. 57. Обобщенная блок-схема подпрограммы 3 (пересчет возбуждений, установление и проторение связей).

можных действий автомата считается запрещенным (разрешенным). При выполнении в особой ситуации запрещенного (разрешенного) действия производится «наказание» («поощрение») автомата путем добавочного возбуждения $i$-модели НПр (Пр). Имеется возможность одновременно с наказанием или поощрением изменить местоположение автомата в среде.

Информация, содержащая описание особых ситуаций, перечисление разрешенных и запрещенных в них действий, а также указания о виде и степени наказаний и поощрений, составляется экспериментатором и является исходной для описываемого алгоритма. При работе автомата алгоритм сравнивает воспринимаемые ситуации с описаниями особых ситуаций, выполняемые в особых ситуациях действия — с разрешенными и запрещенными, а также реализует по заданным правилам операции поощрения и наказания. Подчеркнем еще раз, что информация об особых ситуациях и их свойствах ни в каком виде в М-автомат заранее не вводится. Содержательно она описывает присущие среде свойства, связанные не с отдельными объектами, а с их определенными совокупностями.

**Программная реализация М-автомата.** М-автомат реализован в виде программы, содержащей пять основных подпрограмм.

*Подпрограмма 1* содержит команды ввода информации и ряд подготовительных операций.

*Продпрограмма 2* состоит из алгоритмов восприятия, вычисления функции цели и некоторых вспомогательных. Кроме того, сюда включены алгоритмы, представляющие план действий и реализующие работу систем, следящих за выполнением плана. Обобщенная блок-схема этой подпрограммы приведена на рис. 56, где использованы условные обозначения алгоритмов, введенные ранее. Значения переменных: *chgou* — счетчик шагов; *avch* — счетчик шагов, выполненных после отказа от построенного плана; *prav* — максимально допустимое значение *avch*. Смысл остальных переменных ясен из схемы.

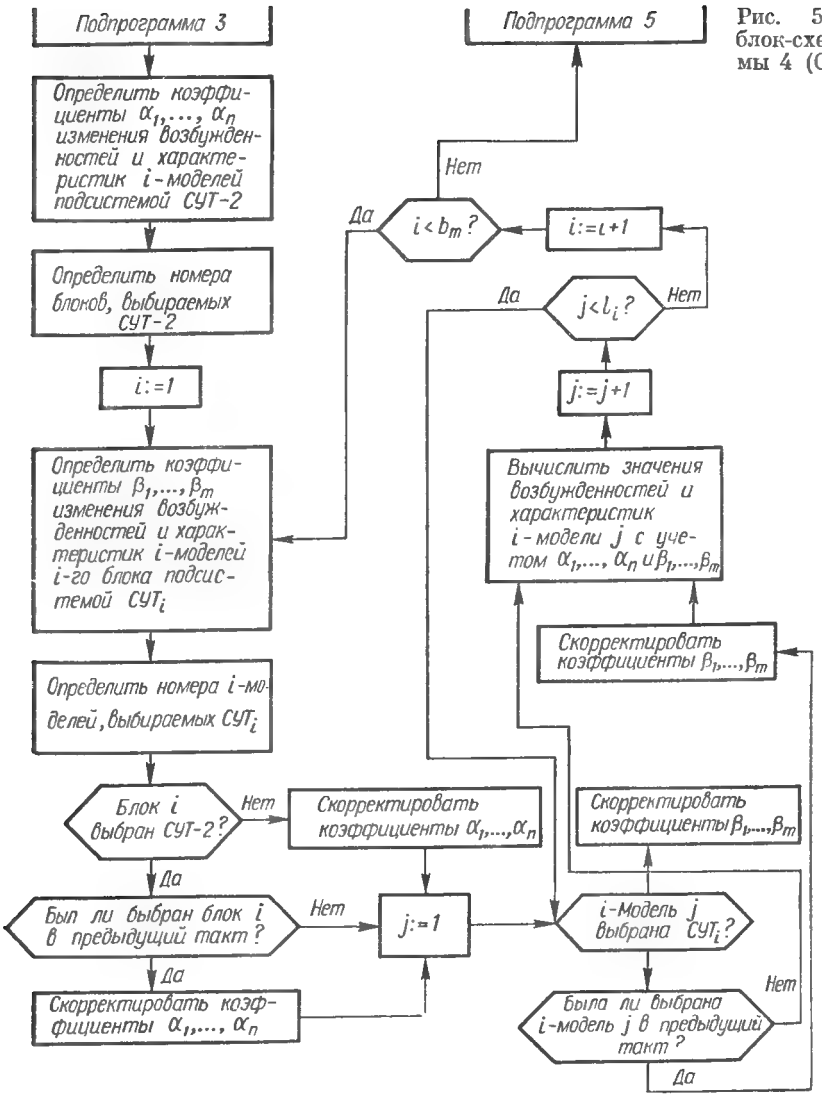



Рис. 58. Обобщенная блок-схема подпрограммы 4 (СУТ).

*Подпрограмма 3* включает в себя все основные операции над М-сетью и содержит алгоритмы пересчета возбуждений, установления и проторения связей и ряд вспомогательных. Ее обобщенная блок-схема приведена на рис. 57.

*Подпрограмма 4* содержит алгоритм $A_{СУТ}$, реализующий функции системы усиления — торможения. Обобщенная блок-схема подпрограммы приведена на рис. 58. В схеме использованы переменные, обозначающие: $l_i$ — количество

$i$-моделей в $i$-м блоке М-сети; $b_m$ — количество блоков М-сети.

*Подпрограмма 5* содержит алгоритм выбора действия и эффекторные алгоритмы. Ее блок-схема приведена на рис. 59. Между подпрограммами установлены отношения, показанные на блок-схеме рис. 60.

Подпрограммы были написаны на входном языке транслятора АЛГОЛ-БЭСМ. Рабочая программа содержит около $11000_8$ команд ЦВМ БЭСМ-6.

Машинное время, необходимое для просчета одного такта работы модели, зависит в основном от количества связей между $i$-моделями сети и в меньшей степени — от количества $i$-моделей. Для основного варианта модели оно составляет 30—50 *сек*. Количество $i$-моделей и связей М-сети автомата, а также размеры всех остальных массивов числовых данных, с которыми оперирует программа, ограничены (в сумме) объемом оперативной памяти машины БЭСМ-6.

Программа позволяет произвольно разбивать М-сеть на сферы или блоки. Поэтому с помощью программы может быть реализовано множество М-автоматов, отличающихся друг от друга количеством $i$-моделей в различных сферах (блоках). Для обозначения разных вариантов М-автомата введем специальную символику. Перечислим еще раз блоки М-сети автомата: блок приема информации (Р); блок понятийных обобщений (П); блок памяти ситуаций (С), блок эмоций (Э), блок желаний (Ж) и блок действий (Д). Пусть правый нижний символ при букве, соответствующей названию блока, обозначает количество $i$-моделей в блоке, а правый верхний — количество уровней его организации. Зафиксируем порядок написания букв: Р, П, С, Э, Ж, Д. Если автомат является вырожденным, т. е. не включает в себя алгоритм $A$сут, после буквы Д будем ставить 0. Если в автомате реализована одноуровневая СУТ, вместо 0 будем ставить 1, а если двухуровневая,— 2. Таким образом, конкретный вариант М-автомата описывается выражением типа

$$\mathrm{Р}_{\alpha_1}^{\beta_1}\mathrm{П}_{\alpha_2}^{\beta_2}\mathrm{С}_{\alpha_3}^{\beta_3}\mathrm{Э}_{\alpha_4}^{\beta_4}\mathrm{Ж}_{\alpha_5}^{\beta_5}\mathrm{Д}_{\alpha_6}^{\beta_6}\mathrm{Х}. \qquad (8.15)$$

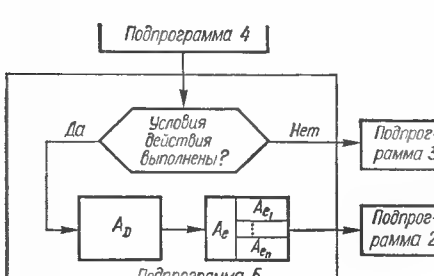



Рис. 59. Обобщенная блок-схема подпрограммы 5 (выбор и реализация действий).

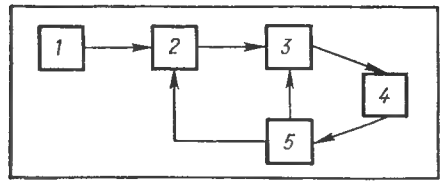



Рис. 60. Обобщенная блок-схема программы (*1—5* — номера подпрограмм).

Например, выражение $Р^1_{45}П^4_{160}С^2_{30}Э^1_{10}Ж^2_{18}Д^3_{32}2$ описывает М-автомат, блок приема информации которого содержит 45 *i*-моделей раздражителей, блок понятийных обобщений — 160 *i*-моделей, организованных в четыре уровня, и т. д., с двухуровневой системой усиления — торможения.

Выражение типа (8.15) будем называть *формулой* М-автомата.

Перейдем теперь к описанию экспериментов, проведенных с моделью двигательного поведения.

*Глава 9*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ

Экспериментальное исследование модели проводилось в два этапа. Первый связан с изучением поведения модели в ряде простых ситуаций — тестов. Основная задача этого этапа состояла в исследовании элементарных процессов обучения. Элементарными (на уровне описания, введенном в предыдущей главе) будем называть процессы обучения, связанные с установлением в М-сети новых связей (функции (8.8)) и изменением проходимостей имеющихся связей (функции (8.9), (8.10)). Содержание работ сводилось к подбору значений существенных переменных в выражениях, задающих систему функций (9.33). Набор значений этих переменных определяет рабочий режим модели. Специфичным для этого этапа было то, что тестовые эксперименты проводились с простыми автоматами. Их упрощали так, что в каждом из тестов на работу автомата оказывали влияние по возможности лишь те из переменных, значения которых подбирались в данном тесте. Дополнительной задачей первого этапа исследований являлась демонстрация некоторых, интересных в практическом плане, возможностей, реализуемых простыми автоматами предложенного типа. Второй этап исследования связан с рассмотрением поведения модели в сложных средах.

Остановимся более подробно на структуре работ первого этапа. Выбор значений параметров в выражениях, задающих систему (9.33), проводился здесь различными способами. Так, оказалось возможным заимствовать некоторые зна-

чения из результатов проведенных ранее работ по исследованию М-автомата РЭМ. Для ряда параметров были определены допустимые области их значений на основе анализа ограничений, вводимых естественным образом при рассмотрении свойств соответствующих процессов. Наконец, для определения допустимых значений некоторых параметров были проведены тестовые эксперименты. Адекватность выбранных значений проверялась также путем проведения тестов, большая часть которых имела демонстрационный характер.

## § 1. *Выбор значений параметров пересчета и установления связей*

В результате исследования М-автомата РЭМ установлены оптимальные значения ряда параметров М-сети и обслуживающих ее алгоритмов. Некоторые из этих значений мы будем использовать в дальнейшем (табл. 7).

Следует отметить, что выбор значений порогов возбуждения $\Theta_i$ для $i$-моделей должен осуществляться отдельно в каждом конкретном случае. Задание $\Theta_i$ определяет общую логику переработки информации сетью и является одним из способов ее предорганизации. Возможности этого способа, глубоко исследованные для сетей из простых формальных нейронов, для случая рассматриваемых нами М-сетей будут продемонстрированы на конкретном примере несколько ниже.

Для того чтобы приступить к выбору параметров установления связей, рассмотрим на примере выражения (8.8а) их содержательное значение. Как указывалось ранее, установление связи между $i$-моделями $i$ и $j$ возможно в случае, когда $\Pi_i^t > 0$, $\Pi_j^t > 0$ и выполнено условие (8.7). Имея в виду это условие, сумму $\Pi_i^t + \Pi_j^t$ можно назвать «разрешающим» фактором установления, поскольку выполнение неравенства

$$(\Pi_i^t + \Pi_j^t) \geqslant 2\Pi_u \tag{9.1}$$

указывает на то, что установление связи в момент $t$ разрешено. Соответственно, параметр $k_0$ определяет «базовое» значение проходимости устанавливающейся связи, т. е. значение, зависящее только от «разрешающего» фактора и не скорректированное «эмоциональным» фактором происходящего акта обучения. Упомянутая коррекция задается значением параметра $k_1$. Очевидно, отношение $k_1/k_0$ определяет значимость «эмоционального» фактора в обучении. Так, при постоянных значениях возбужденностей $i$-моделей увеличение $k_1$ повышает «чувствительность» системы к поощрениям. Аналогичные рассуждения могут быть проведены относительно выражения (8.8б).

Пусть

$$k_0 = Ak_1, \quad \tilde{k}_0 = B\tilde{k}_1. \tag{9.2}$$

Выбирая различные значения $A$ и $B$, будем задавать конструируемой системе различные «характерологические» свойства. С целью упрощения дальнейших расчетов примем

$$A = B = 1. \tag{9.3}$$

Тогда с учетом (9.3) функция (8.8) может быть записана в виде

$$r_{ij}^t = k_0 (\Pi_i^t + \Pi_j^t + \Delta^t), \tag{9.4а}$$

$$\tilde{r}_{ij}^t = \tilde{k}_0 (\Pi_i^t + \Pi_j^t - \Delta^t). \tag{9.4б}$$

Потребуем, чтобы процесс установления удовлетворял следующему условию. Если в момент $t$ возбужденности $\Pi_i^t = \Pi_{ср}$, $\Pi_j^t = \Pi_{ср}$ и $\Delta^t = 0$ и если в момент $t+1$ возбужденность $\Pi_j^{t+1} = \Pi_{ср}$, то после пересчета по установившейся в момент $t$ связи $R_{ij}^t$ должно выполняться условие $\Pi_i^{t+1} \approx \Pi_{ср}$.

Интуитивным обоснованием этого условия являются такие соображения. В процессе установления в М-сети возникают связи, содержащие усиливающие и тормозные компоненты. Дальнейшее обучение сети связано с изменением этих компонентов в ходе их проторения и затухания. Поэтому вновь установившаяся связь $R_{ij}$ должна допускать в будущем как увеличение, так и уменьшение своих компонентов. Иными словами, только что установившаяся связь должна быть «средней» в том смысле, что при среднем возбуждении $i$-модели $j$ она должна обеспечивать близкое к среднему возбуждение $i$-модели $i$. Близкими к среднему будем считать значения $\Pi_i$, лежащие в интервале $0{,}7\Pi_{ср} \leqslant \Pi_i \leqslant 1{,}3\Pi_{ср}$.

Таблица 7

| Название параметра | Обозначение | Область допустимых значений |
|---|---|---|
| Коэффициент возбуждения | $K_н$ | 30—50 |
| Коэффициент торможения | $m$ | 0,2 |
| Коэффициент затухания | $\alpha$ | 0,4—1 |
| Порог | $\theta$ | 0—100 |
| Минимальное возбуждение $i$-модели | $\Pi_{min}$ | 5 |
| Проходимости связей | $r_{ij}$, $\tilde{r}_{ij}$ | 0—1 |
| Средняя по времени возбужденность $i$-моделей | $\Pi_{ср}$ | 100 |

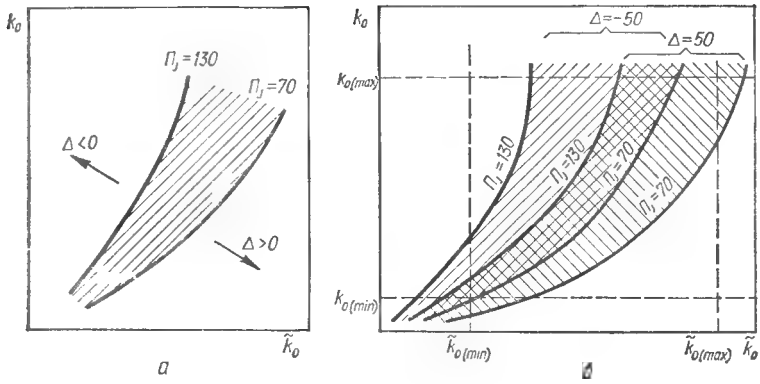



Рис. 61. К определению допустимых значений параметров установления.

Определим теперь значения $k_0$ и $\tilde{k}_0$, обеспечивающие выполнение введенного условия. Используя данные табл. 7, примем: $k_н = 40$; $m = 0{,}2$; $\Theta = 0$; $\alpha = 0$; $\Pi_{ср} = 100$. Подставляя эти значения в выражение (8.5) и имея в виду запись (9.4), получим выражения для верхней и нижней границ области допустимых значений параметров $k_0$ и $\tilde{k}_0$: для верхней границы

$$k_0 = e^{\frac{130}{16\cdot 10^4}\cdot\frac{1}{\tilde{k}_0}} - 9{,}9, \qquad (9.5а)$$

для нижней границы

$$k_0 = e^{\frac{70}{16\cdot 10^4}\cdot\frac{1}{\tilde{k}_0}} - 9{,}9. \qquad (9.5б)$$

Найденная область схематически изображена на рис. 61,*а*.

Введем теперь в рассмотрение влияние «эмоционального» фактора обучения, которому в функции установления соответствует переменная $\Delta^t$. Легко видеть, что при $\Delta^t > 0$ возбужденность $\Pi_l^{t+1}$, равная, например, 70, может быть получена при меньшем значении $k_0$ и большем значении $\tilde{k}_0$, чем это имело бы место при $\Delta^t = 0$. Это соответствует сдвигу области допустимых значений параметров на рис. 61,*а* вправо. Аналогично, при $\Delta^t < 0$ область сдвигается влево. На основании опытов с необучаемой моделью можно полагать, что значение $\Delta$ в ходе работы М-сети изменяется в диапазоне $-50 \leqslant \Delta \leqslant 50$. Не составляет труда получить выражение типа (9.5) для границ области допустимых параметров в крайних точках этого диапазона. Схема расположения областей в этом случае представлена на рис. 61, *б*, где подобласть с двойной штриховкой и определяет совокупность таких значений параметров, которые при любом $\Delta$ (внутри заданного интервала) обеспечивают установление

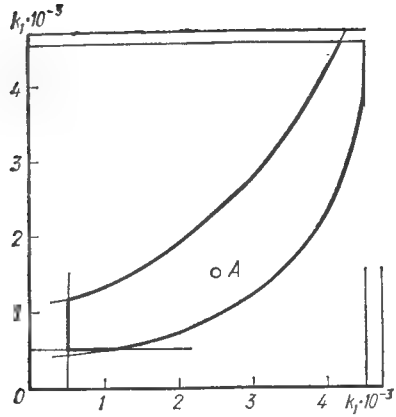



Рис. 62. Область допустимых значений параметров установления связей ($A$ — рабочие значения параметров).

средней (в указанном выше смысле) связи. Упомянутая подобласть и составляет теперь область допустимых значений параметров $k_0$ и $\tilde{k}_0$. Еще одно ограничение на эту область накладывается требованиями, предъявляемыми к величине проходимостей связей $r_{ij}$, $\tilde{r}_{ij}$ (см. табл. 7). Потребуем, чтобы при $\Delta = 0$ выполнялось неравенство $0{,}1 \leqslant r \leqslant 0{,}9$. Тогда из (9.4) можно определить минимально и максимально допустимые значения $k_0$ и $\tilde{k}_0$ и соответственно ограничить область их значений (пунктир на рис. 61, *б*). Окончательный вид области допустимых значений параметров $k_0$ и $\tilde{k}_0$ приведен на рис. 62. В качестве рабочей точки для дальнейших экспериментов выбрана точка $A$, т. е. $k_0 = k_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$; $\tilde{k}_0 = \tilde{k}_1 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$.

Реализация функции установления связей в виде подблока $A_R$ алгоритма $A$ обеспечивает определенные возможности обучения М-автомата. Некоторые из них будут продемонстрированы в следующем параграфе.

## § 2. *Демонстрационные тесты*

Необходимо убедиться в том, что выбранные значения параметров установления могут обеспечить решение автоматом определенных задач. Поскольку установление связей является лишь одним из возможных механизмов обучения, рассмотрим лишь такие задачи, для решения которых живые организмы используют (предположительно) способность к установлению временных связей между раздражителями различного рода. Психология и зоопсихология могут предложить большое количество таких задач. Мы рассмотрим только некоторые.

**Классическое обусловливание.** В настоящее время известно большое количество моделей условного рефлекса (см., например, работы [9, 13, 52, 56 и др.]). Наши интересы в этой области ограничены принятой ранее постановкой задачи: из всего множества процессов и явлений обусловливания мы можем рассматривать лишь те, которые непосредственно связаны с проявлением двигательного поведения в средах заданного типа. (Мы не претендуем на модельное описание физиологических и других процессов, изученных в лабораторных условиях.) Сопоставление отдельных важных процессов и экспериментальных процедур обусловливания с процессами, реализуемыми в М-автомате, показывает, что по крайней мере некоторые из основных процессов обусловливания естественно интерпретируются в терминах, описывающих структуру и функционирование М-автоматов. Можно полагать, что язык М-сетей послужит хорошей основой для построения более полных моделей обусловливания. Работы в этом направлении могут составить самостоятельную область исследований.

Рассмотрим теперь конкретный М-автомат, способный формировать условные реакции, и его работу при решении задачи «идентификации восприятий».

Задача «идентификации восприятия» возникает в тех случаях, когда организм воспринимает некоторое раздражение, но не обладает информацией относительно его биологической важности (раздражитель «незнаком»). При этом оказывается невозможным и выбор реакции на раздражение. Определение «значения» такого раздражителя и составляет содержание задачи идентификации. Человек может ставить и решать эту задачу на сознательном уровне. Животных побуждает к ее решению ориентировочный рефлекс. Решение может достигаться как путем формирования новых понятий и представлений (у человека), так и путем прямого связывания образа нового раздражителя с образами других, известных ранее. В последнем случае новый раздражитель может приобретать сигнальное значение. Классический условный рефлекс представляет пример решения задачи идентификации путем связывания ранее индифферентного раздражителя с другим, имеющим безусловное значение. Здесь мы ограничимся рассмотрением весьма простого варианта задачи.

Пусть в простой среде имеются объекты из класса «пища» и пусть в соответствующих этим объектам ячейках среды задана отличная от нуля интенсивность параметра «запах». В среде находится М-автомат, способный к осуществлению действий-шагов. Предположим, что объект «пища» известен автомату в том смысле, что восприятие такого объекта вызывает реакцию приближения к нему. Это означает,

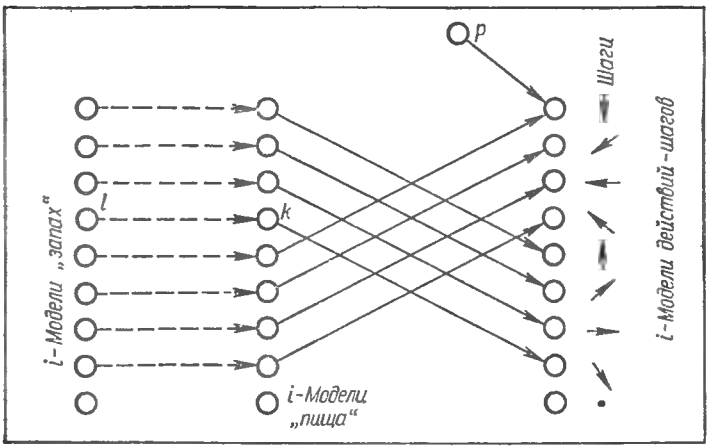



Рис. 63. М-сеть автомата.

что между $i$-моделями объекта и действий-шагов есть соответствующие связи. Предположим также, что автомат может воспринять «запах», но «не знает» значения этого параметра, т. е. $i$-модели запаха не имеют связей с другими $i$-моделями сети. Пусть в течение некоторого времени $T$ автомат перемещается в среде и воспринимает как объекты «пища», так и связанный с ними «запах». Будем полагать, что автомат решает задачу идентификации параметра «запах», если по прошествии времени $T$ этот параметр приобретает для него сигнальное значение, т. е. восприятие «запаха» вызывает выполнение автоматом реакции приближения (соответствующих шагов).

Был проведен эксперимент с М-автоматом, который описывался формулой $Р^{1}_{18}Д^{1}_{9}1$. В дополнение к установленным ранее значениям параметров было принято: $\Theta = 1$, $\alpha = 0$. Структура автомата приведена на рис. 63. В исходном состоянии связи, изображенные на рисунке штриховыми линиями, отсутствовали. Здесь и в дальнейшем при изображении структуры автоматов используется следующий упрощающий прием. Существующие в рассматриваемой среде объекты и параметры могут быть восприняты автоматом в девяти различных (относительно него) положениях. Каждый объект и параметр среды в рецепторной сфере автомата будем представлять девятью $i$-моделями, каждая из которых соответствует объекту, воспринимаемому из определенной ячейки окрестности. Пусть автомат находится в ячейке с координатами (0, 0). Зафиксируем порядок перечисления ячеек окрестности: (0, −1), (−1, −1), (−1, 0), (−1, 1), (0, 1), (1, 1), (1, 0), (1, −1), (0, 0). При графическом изображении структуры автомата $i$-модели объекта, воспри-

нимаемого из различных ячеек окрестности, будем располагать по горизонтали или вертикали так, чтобы их следование слева направо или сверху вниз соответствовало порядку перечисления ячеек окрестности. Так, на рис. 63 $i$-модель $k$ соответствует объекту «пища», воспринимаемому из ячейки с координатами $(-1, 1)$.

Автомат, структура которого изображена на рис. 63, помещался в ячейку $A$ среды, изображенной на рис. 64. Вспомогательной $i$-модели $p$ задавалось некоторое постоянное возбуждение, что обеспечивало передвижение автомата в направлении, указанном стрелками, до ячейки $B$. На рисунке отмечены крестиками ячейки, в которых интенсивность параметра «запах» отличалась от нуля. Видно, что в ряде ячеек среды осуществлялось одновременное восприятие как «пищи», так и «запаха», условие установления (8.7) оказывалось выполненным и в соответствии с правилами (8.8) между $i$-моделями устанавливались связи, изображенные на рис. 63 пунктиром. Если теперь в какой-либо ячейке окрестности автомата, например $(-1, 1)$, будет воспринят «запах», то возбуждение соответствующей $i$-модели $l$ по установившейся связи вызовет возбуждение $i$-модели «пища» $k$, а последнее, в свою очередь, обеспечит выполнение шага, реализующего реакцию приближения к ячейке, содержащей «запах». Таким образом, задача идентификации параметра оказывается решенной.

Адекватность реакций обученного М-автомата иллюстрируется его поведением в среде, изображенной на рис. 65, где сплошные линии соединяют ячейки с одинаковой интенсивностью параметра «запах», указанной в разрывах линий. Стрелки обозначают шаги автомата, помещенного первоначально в ячейку $A$. Видно, что автомат быстро достигает области с максимальным значением параметра и далее выполняет в ней случайные блуждания. Вспомогательная $i$-модель $p$ в этом эксперименте не возбуждалась.

**Задача случайного поиска.** Задача случайного поиска методом «проб и ошибок» возникает в ситуациях, где возможно некоторое множество априорно равноценных реакций, и состоит в нахождении реакций, наилучших в некотором заранее определенном смысле.

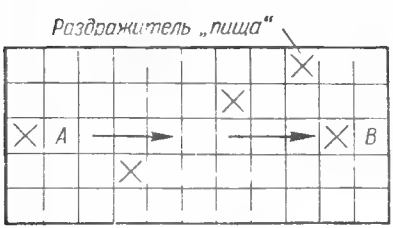



Рис. 64. Обучающая среда.

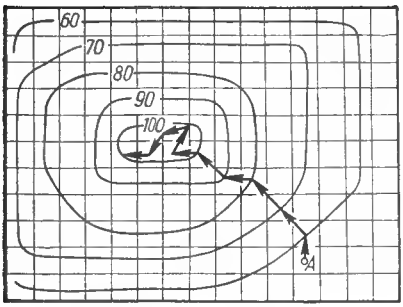



Рис. 65. Контрольный эксперимент. Поиск экстремального значения параметра.

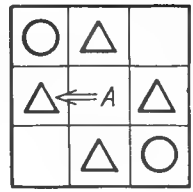



Рис. 66. Обучающая среда.

Экспериментальная ситуация строилась следующим образом. М-автомат помещался в ячейку $A$ среды, изображенной на рис. 66, где знаками ○ и △ отмечены различные объекты из класса «пища». Окрестность $A$ представляла собой «особую» (см. § 3, гл. 8) ситуацию, единственным разрешенным действием которой являлось выполнение шага, отмеченного на рисунке двойной стрелкой. После выполнения любого шага автомат возвращался в исходную ячейку. Объекты, имеющиеся в среде, были «знакомы» автомату — между их $i$-моделями и $i$-моделями действий-шагов задавались связи. Информация о том, какой шаг является разрешенным, в автомат не вводилась. Предполагалось, что после выполнения ряда пробных шагов автомат «обучится» и будет многократно выполнять только разрешенное действие.

Эксперимент проводился с М-автоматом, структура которого изображена на рис. 67. Автомат описывается формулой $Р^{1}_{18}С^{1}_{4}Э^{1}_{2}Д^{1}_{9}1$. В дополнение к установленным ранее значениям параметров было принято: $\Theta = 1$; $\alpha = 0{,}5$. В исходном состоянии связи, изображенные на рисунке пунктиром, отсутствовали. После первого восприятия ситуации «резервный» элемент $a$ сферы ПС становился $i$-моделью этой ситуации (алгоритм $B_{sit}$). Далее автомат выполнял некоторый шаг. В случае, если шаг не был разрешенным, возбуждалась $i$-модель НПр (алгоритм $B_z$) и между $i$-моделями ситуации и выполненного шага устанавливалась связь (алгоритм $B_0$) с преобладающим значением тормозной компоненты (функция (8.8)). При повторном восприятии ситуации возбуждалась ее $i$-модель и, благодаря установившейся связи, возбуждение $i$-модели неразрешенного шага тормозилось. СУТ, следовательно, выбирала другой шаг, и весь процесс повторялся. В случае, если выполнялся разрешенный шаг, между его $i$-моделью и $i$-моделью ситуации устанавливалась связь с преобладающим значением усиливающей компоненты. Это обеспечивало при повторных восприятиях ситуации дополнительное возбуждение $i$-модели разрешенного шага и, сле-

довательно, постоянное его выполнение. Результаты эксперимента графически изображены на рис. 68, где показано изменение во времени возбужденностей $i$-моделей автомата. Графики иллюстрируют приведенное выше качественное описание процесса обучения.

Следует остановиться на рассмотрении двух особенностей поведения автомата, обнаруженных в ходе эксперимента. Первая из них состоит в том, что последовательность пробных действий в ходе поиска, вообще говоря, не является случайной. Анализ работы автомата показывает, что вид этой последовательности определяется (при заданной системе связей в М-сети) структурой ситуации, в которой находится автомат. Это соответствует и интуитивному представлению о разумности поведения: в незнакомой ситуации человек или животное испытывает прежде всего то действие, которое почему-либо представляется «естественным», «напрашивается» и т. п. Смысл такого рода терминов может быть несколько уточнен при установлении аналогий между поведением живых организмов и автоматов описываемого типа.

Вторая особенность поведения М-автомата состоит в следующем. Из рис. 68 видно, что графики возбуждения $i$-моделей Пр и НПр представляют собой гладкие кривые, в то время как возбуждение этих $i$-моделей увеличивалось алгоритмом $B_2$ дискретно, в каждый момент времени на постоянную величину. На содержательном уровне это означает, что автомат «субъективно искажает» значения предъявляемых ему поощрений и наказаний или, точнее, формирует внутреннее представление поощрения и наказания, которое

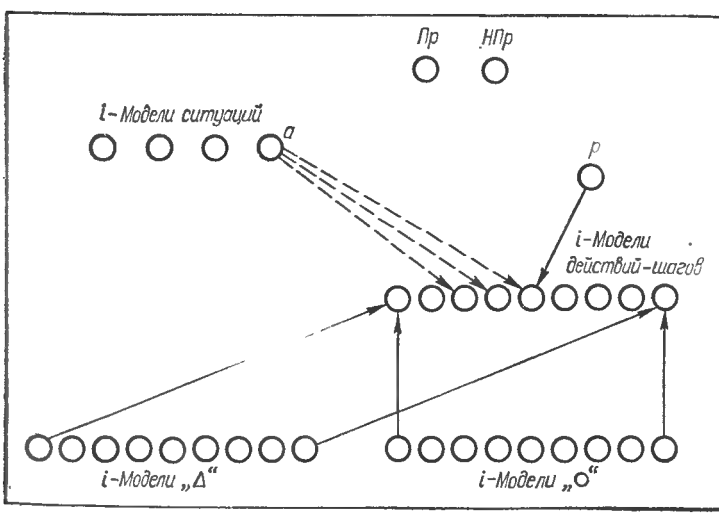



Рис. 67. М-сеть автомата.

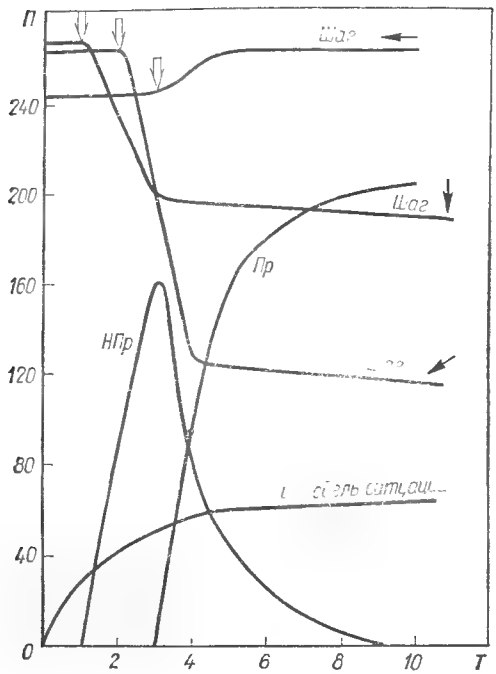



Рис. 68. Внутренние реакции М-автомата в ходе обучения.

не всегда совпадает с реальным значением этих факторов. Анализ работы алгоритма показал, что степень и вид «субъективного искажения» поощрений и наказаний определяются значением коэффициента затухания $\alpha$ в функции пересчета (8.5). Рассмотрим это явление в общем виде. Пусть автомату в течение $n$ тактов предъявляется фактор наказания. Это означает, что в каждый момент дискретного времени реализуется операция $\Pi^t_{\text{НПр}} := \Pi^t_{\text{НПр}} + V$, где $V$ — величина наказания. Тогда возбужденность $i$-моделей НПр будет изменяться во времени (с учетом работы алгоритма $A$) следующим образом (табл. 8):

Таблица 8

| Такт | Значение $\Pi_{\text{НПр}}$ |
|---|---|
| 1 | $\alpha V$ |
| 2 | $\alpha(\alpha V + V) = \alpha^2 V + \alpha V$ |
| 3 | $\alpha[\alpha(\alpha V + V) + V] = \alpha^3 V + \alpha^2 V + \alpha V$ |
| ⋮ | ⋮ |
| $n$ | $\alpha^n V + \alpha^{n+1} V + \cdots + \alpha V$ |

Пусть $n$ достаточно велико. Обозначим $\Pi^n_{\text{НПр}} = V_{\text{эф}}$. Тогда

$$V_{\text{эф}} = V(\alpha^n + \alpha^{n-1} + \cdots + \alpha).$$

Выражение в скобках правой части есть степенной ряд, следовательно,

$$V_{\text{эф}} = V\frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

Таким образом, при непрерывном предъявлении автомату наказания $V$ эффективная («субъективная») величина наказания стремится к $V_{\text{эф}}$. Динамика изменения эффективной величины наказания при различных $\alpha$ иллюстрируется графиками на рис. 69. С помощью выражения для $V_{\text{эф}}$ можно описать также изменения «эмоционального» фактора обучения $\Delta^t$ при смене характера подкрепления (появление поощрения после наказания и наоборот). В качестве примера на рис. 69 приведены кривые (штриховые линии) изменения величин $\Pi_{\text{Пр}}$, $\Pi_{\text{НПр}}$ и $\Delta$ в случае, когда после ряда наказаний автомат начинает получать поощрения. Момент изменения характера подкреплений отмечен на оси времени стрелкой. Видно, что поощрение «воспринимается» автоматом не сразу: в первый момент $\Delta$ мало и лишь со временем достигает значения, соответствующего реальной величине поощрения. Длительность этого процесса определяется «предысторией» автомата: чем меньше наказаний получил автомат до момента смены характера подкреплений, тем большим оказывается начальное значение $\Delta$ (точки $A$, $A'$, $A''$ на штрихпунктирной кривой). Описанные процессы соответствуют некоторым интуитивным представлениям о динамике эмоциональных состояний.

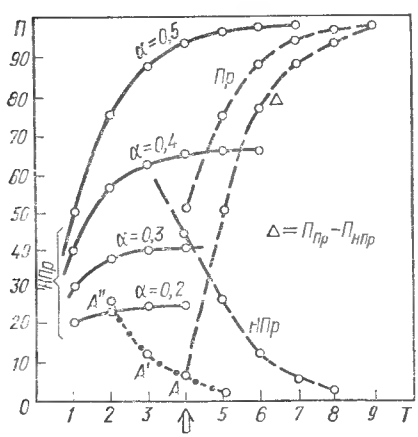



Рис. 69. Изменения эффективной величины наказания.

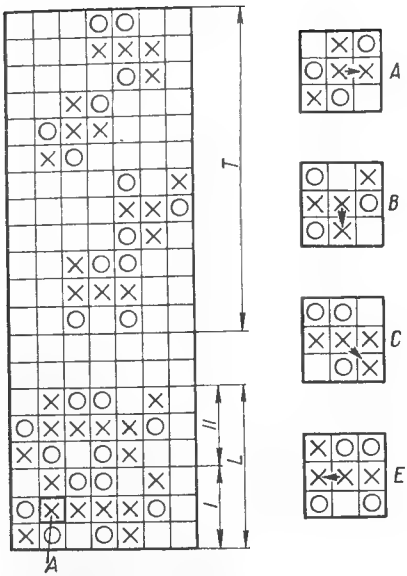



Рис. 70. Обучающая среда.

**Задача параллельного обучения.** Эта задача возникает в случаях, когда поиск правильных решений ведется для $n (n > 1)$ ситуаций и ситуации предъявляются неупорядоченно во времени. В этих условиях процесс обучения может быть затруднен или нарушен, поскольку на выбор реакции в любой из ситуаций могут влиять результаты проб, выполненных в остальных $n - 1$ ситуациях. Эксперимент строился следующим образом. Автомат помещался в ячейку $A$ среды, изображенной на рис. 70. Среда содержала четыре «особых» ситуации — $A$, $B$, $C$ и $E$ (изображены на рисунке отдельно). После выполнения пробы в одной из этих ситуаций с помощью алгоритма $B_I$ автомат перемещался в другую ситуацию. Перемещения осуществлялись по схеме $A \to C \to \to E \to B \to A$. Разрешенные шаги в каждой из ситуаций указаны на рис. 70 стрелками. При выполнении разрешенного шага возбуждалась $i$-модель Пр, неразрешенного — НПр. Основное обучение автомата проводилось на участке среды $L$, разделенном на одинаковые «классы» I и II. Начиная поиск в ячейке $A$, лежащей в области I класса, автомат перемещался во II класс после выполнения первой удачной пробы. Перемещение осуществлялось в соответствии с приведенной схемой. После выполнения удачной пробы во II классе автомат помещался последовательно в ситуации $E$, $B$, $A$, $C$ зоны $T$ среды («экзамен»). Если все действия выполнялись правильно, обучение считалось оконченным. Если же в какой-либо ситуации зоны $T$ выполнялось нераз-

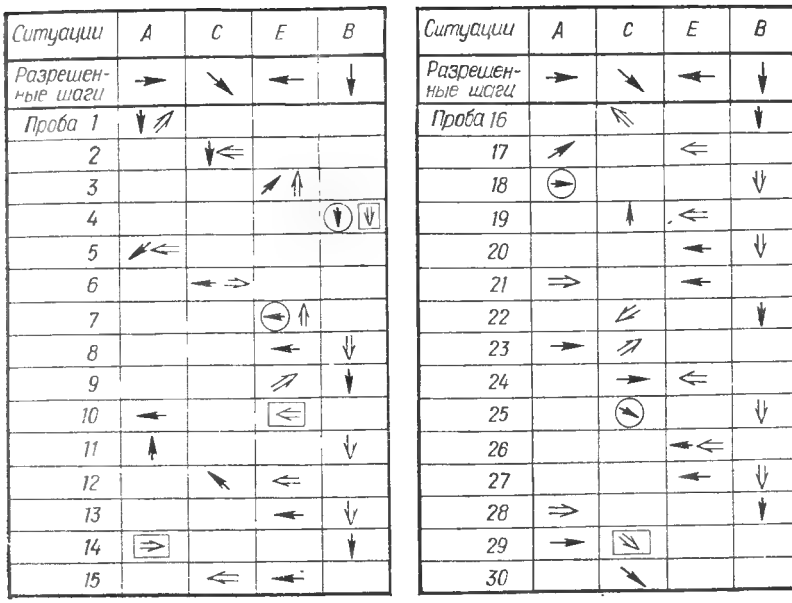



Рис. 71. Поиск решения автоматом и человеком.

решенное действие, автомат возвращался в подобную ситуацию I класса. Таким образом, чтобы выполнить разрешенные действия во всех ситуациях зоны $T$, автомат должен решить задачу параллельного обучения в четырех ситуациях.

Эксперименты проводились с автоматом, структура которого изображена на рис. 67. Результаты эксперимента приведены на схеме рис. 71, где одинарные стрелки соответствуют шагам, выполненным автоматом в последовательные моменты времени, а двойные — человеком (первые правильные решения для каждой ситуации обведены). Видно, что задача решена автоматом за 30 проб.

Представляет интерес сравнение поведения автомата с поведением людей при решении аналогичной задачи. Условия проведенного нами психологического эксперимента полностью моделировали условия эксперимента с автоматом. Испытуемым предъявлялись карты, соответствующие ситуациям $A$, $B$, $C$ и $E$. Требовалось для каждой ситуации найти единственную допустимую реакцию, состоящую в «нажимании» одной из восьми условных кнопок, изображение которых находилось в поле зрения испытуемых. Результаты проб сообщались испытуемым словами «правильно» и «неправильно». Порядок предъявления карт-ситуаций соответствовал схеме перемещения автомата в среде рис. 70. Эксперимент проводился с группой из 10 взрослых испытуемых.

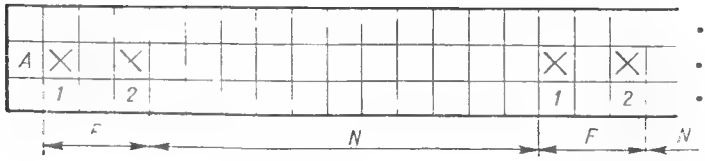



Рис. 72. Обучающая среда.

Задача была решена всеми испытуемыми. Среднее по группе количество проб составило 49,2, минимальное количество — 28, максимальное — 96. В качестве примера на рис. 71 двойными стрелками изображены реакции испытуемого *T*. Из эксперимента видно, что поведение автомата при решении задачи параллельного обучения входит в класс поведений людей-испытуемых при решении ими аналогичной задачи. Следует отметить, что в тех случаях, когда испытуемые затрачивали для решения задачи большое число проб, наблюдались либо нарушения инструкции (например, попытки обнаружить закономерную связь между номерами ситуаций и правильных реакций), либо феномен забывания уже найденных правильных реакций. Эффект затягивания обучения легко достигается в автомате как увеличением амплитуды помех (случайных возбуждений) так и введением операторов затухания связей.

**«Пороговая логика» в М-сети.** Рассмотрение возможностей предпрограммирования М-автоматов путем задания параметра $\Theta$ (см. функцию (8.5)) целесообразно провести в данном разделе, поскольку оно связано в основном с проведением специального демонстрационного теста.

Придавая определенные значения параметрам М-сети (в частности, для всех $i$ $\alpha_i = 0$, $K_{ni} \geqslant 40$, $\Pi_{max} = 1$, $\Pi_{min} = 0$, обучение связей отсутствует), можно привести ее к виду, аналогичному сетям из формальных нейронов. Показано, что при соответствующем подборе порогов и конфигурации связей сеть из формальных нейронов в состоянии реализовать любую систему логических высказываний. По аналогии можно предположить, что подобное утверждение приложимо и к М-сетям. Спецификой последних является то, что требования к их организации могут быть сформулированы на содержательном уровне, т. е. в конкретном языке решаемой задачи. Продемонстрируем это на примере.

Пусть автомат расположен в ячейке *A* среды, изображенной на рис. 72. Участок *F* среды содержит раздражители 1 и 2 группы «пища». Участок *N* не содержит никаких раздражителей. Пусть среда продолжена от места обрыва на рисунке сколь угодно далеко, причем участки *F* и *N* чередуются. Автомат передвигается из ячейки *A*, постоянно выполняя действие-шаг (⟶). Участок *F* может быть пройден им за 3 шага, участок *N* — за *n* шагов. Пусть автомат «ощу-

щает» голод, т. е. существует одноименная $i$-модель, возбуждение которой после каждого шага увеличивается на постоянную величину $d$. Кроме действий-шагов автомат может выполнять действия «есть» и «нести». Предполагается, что «переживание» голода вызывает чувство «неприятно», т. е. возбуждается $i$-модель НПр. Необходимо построить автомат так, чтобы его поведение было оптимальным, т. е. сумма возбуждений НПр за время прохождения каждой пары участков $F$ и $N$ была минимальной. Из интуитивных соображений ясно, что автомат должен полностью использовать «ресурсы среды», т. е. «съедать» обе «пищи», находящиеся в каждом из участков $F$. Следовательно, «пища 1» должна быть «съедена» в той ячейке, где она расположена, а «пища 2» перенесена в участок $N$ и «съедена» после выполнения $t$ шагов от места расположения «пищи 1». Учитывая линейный характер зависимости возбужденности $i$-модели «голод» от числа шагов, запишем выражение для суммы возбуждений НПр (ΣНПр):

$$\frac{1}{2}t^2d - \frac{1}{2}(n+2-t)^2d = \Sigma\text{НПр}, \tag{9.6}$$

или после преобразований

$$t^2 - (n+2)t = \frac{\Sigma\text{НПр}}{d} - \frac{n+2}{2}. \tag{9.7}$$

Правая часть равенства минимальна при значении $t$, обращающем в нуль первую производную левой части, отсюда оптимальное значение $t_{\text{опт}}$ числа шагов между последовательными выполнениями действия «есть» определяется как $t_{\text{опт}} = \frac{n+2}{2}$.

Таким образом, оптимальность любого варианта поведения автомата может быть оценена по значению критерия

$$\gamma = |t - t_{\text{опт}}|. \tag{9.8}$$

При $\gamma = 0$ поведение оптимально.

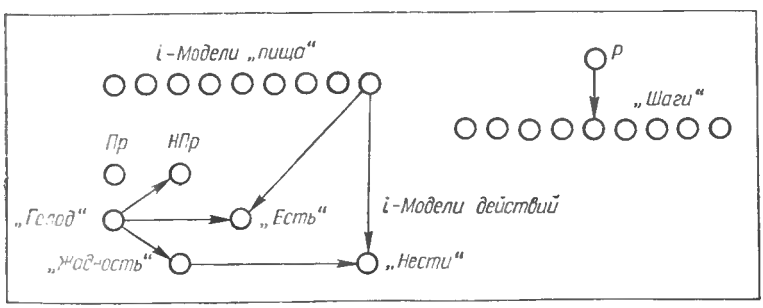



**Рис. 73. М-сеть автомата.**

Таблица 9

| Название $i$-моделей | Параметры $i$-моделей | | |
|---|---|---|---|
| | $K_n$ | $\alpha$ | $\Theta$ |
| «Голод» | 30 | 0 | 1 |
| «Жадность» | 20 | 0,9 | 25 |
| «Есть» | 50 | 0 | 90 |
| «Нести» | 60 | 0 | 70 |
| Шаги | 30 | 0 | 1 |
| $d = \text{var}$, $t_{опт} = 13$ | | | |

Исследовался автомат, структура которого изображена на рис. 73. Формула автомата: $Р^1_9Э^1_2Ж^1_2Д^1_{11}$; $p$ — вспомогательная, постоянно возбужденная $i$-модель. В сферу желаний введена $i$-модель «жадность», возбуждение которой является интегральной по времени оценкой «переживания» голода. Проходимости всех связей: $r_{ij} = 1$, $\tilde{r}_{ij} = 0$. Обучение отсутствует. Параметры $i$-моделей приведены в табл. 9. Автомат помещался в среду с $n = 23$ и вел себя следующим образом. Первый участок $F$ автомат прошел, не выполнив действий «есть» или «нести», поскольку $i$-модель «голод» была возбуждена слабо. Во втором участке $F$ была «съедена» «пища 1». В третьем участке $F$ также была «съедена» «пища 1» и перенесена в участок $N$ «пища 2», однако значение $\gamma$ превысило 12, что указывало на неудачный выбор параметров. Оптимизация автомата проводилась путем подбора значения параметра $d$, что эквивалентно изменению порога $i$-моделей «есть» и «нести». Полученная экспериментальная зависимость приведена на рис. 74. Настройку автомата можно провести также путем изменения порога $i$-модели «жадность». В последнем случае изменяется и длина на-

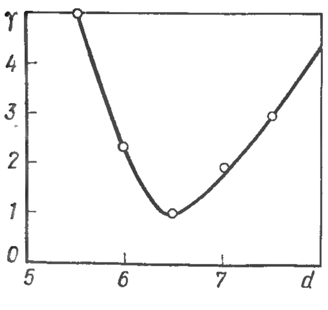



Рис. 74. Влияние величины порогов на поведение М-автомата.

чального периода обучения. Таким образом, задание порогов является удобным способом предварительной организации «внутренней логики» переработки информации М-автоматов.

## § 3. *Выбор значений параметров проторения связей. Задача избегания наказаний*

Определим область допустимых значений параметров $k_2$ и $\tilde{k_2}$ в выражении (8.10) при условии отсутствия затухания связей, т. е. если $\beta = \tilde{\beta} = 1$ и, следовательно,

$$z^{t+1}_{ij} = r^{t}_{ij}. \tag{9.9}$$

Рассмотренный выше процесс установления связей обеспечивает обучение автомата в тех случаях, когда оказывается достаточным сравнительно небольшое (в пределах 0,7—1,3 начального значения) изменение возбужденности $i$-моделей. Характерным здесь является также обучение «с первого предъявления» — результат каждой пробы фиксируется связью и дальнейшей коррекции не подвергается. На практике, однако, обучение живых организмов «с первой пробы» встречается весьма редко. Более того, оно весьма редко является целесообразным, поскольку естественная среда, как правило, предъявляет организму случайные последовательности воздействий. Обучение должно, таким образом, обеспечивать выделение статистических закономерностей в среде. Для этого необходимо, чтобы за каждым отдельно взятым актом обучения следовало лишь малое изменение в связях (коэффициентах, параметрах) системы. В М-автоматах такой процесс обеспечивается функцией проторения.

При исследовании процессов обучения животных и человека часто используют эксперименты, связанные с обучением уклонению от боли или избеганию наказаний [13]. Условия экспериментов такого рода обладают рядом важных для нас свойств. Прежде всего, такие эксперименты предполагают многократные предъявления обучающего воздействия, в ходе которых испытуемый улучшает свое поведение постепенно. Далее, однородность применяемых раздражителей и их характер (обычно используются биологически важные раздражители) облегчают испытуемому запоминание ситуаций, так что в экспериментах такого рода забыванием обычно пренебрегают. Имея в виду указанные свойства, выберем задачу обучения избеганию наказаний в качестве тестовой для настройки М-автомата.

Выбор параметров проторения проведем следующим образом. Построим вычислительную модель соответствующего эксперимента, используя в качестве «испытуемого» М-автомат

с неопределенными параметрами $k_2$ и $\tilde{k}_2$. Далее, применяя данные относительно параметров процесса обучения, известные в психологии, а также учитывая вводимые естественным образом ограничения, определим такую область значений $k_2$ и $\tilde{k}_2$, в которой поведение автомата является удовлетворительным. В дальнейшем будем считать эту область областью допустимых значений параметров.

Методики экспериментов по обучению избеганию наказаний хорошо разработаны. Мы выбрали следующую их модификацию. Автомат помещался в среду (10×10 ячеек), которая случайным образом заполнялась раздражителями из группы «опасность». Всего в среде располагалось 66 раздражителей так, что вероятность попадания каждого из них в любую из ячеек среды составляла 0,66. В этой среде автомат выполнял случайные шаги. Автомат включал в себя девять $i$-моделей раздражителя «опасность», девять $i$-моделей действий-шагов и $i$-модели Пр и НПр (формула $Р^1_9Э^1_2Д^1_91$). Связи в исходном состоянии не задавались. Перед каждым пересчетом $i$-моделям действий-шагов приписывались случайные значения $E_i$ и $\tilde{E}_i$ (см. 8.5) так, что математическое ожидание величины $П^t_i$ для всех $i$-моделей шагов $П_{ср} = 100$. Таким образом, вероятность выполнения любого действия-шага в конце такта, т. е. после работы алгоритма $A_{сут}$, составляла $^1/_9$. Если в процессе случайных блужданий автомат занимал ячейку, в которой находился раздражитель, то $i$-модели НПр приписывалось возбуждение (50 усл. ед.), и между $i$-моделью шага, приведшего в занятую ячейку, и соответствующей $i$-моделью раздражителя устанавливалась связь с преимущественной тормозной компонентой. При повторениях описанной ситуации связь проторялась. После ряда проторений тормозные компоненты связей обеспечивали такие воздействия на $i$-модели шагов, что, несмотря на случайные возбуждения последних, М-автомат не выполнял шагов, переводящих его в занятые ячейки. Таким образом, автомат оказывался обученным избеганию объекта «опасность».

Для того чтобы получить числовые характеристики исследуемого процесса, наложим ограничения на время обучения автомата. Потребуем, чтобы обучение правильной реакции на один раздражитель, например «опасность справа», требовало 3—5 повторений ошибочного шага — это примерно соответствует количеству необходимых предъявлений (проб) для обучения высших животных. Установим, сколько всего случайных шагов должен делать автомат в среде, чтобы каждое из возможных действий было неправильно выбрано 3—5 раз. Обозначим это число шагов через $N$. Тогда нас не будут интересовать автоматы, обучающиеся более чем за $N$ шагов,— они будут являться «неудачными» варианта-

ми. Дальнейшее рассуждение проведем, исходя из требования, чтобы каждый из шагов был выбран $4 \cdot \frac{1}{0{,}66} = 6$ раз.

Представим задачу в теоретико-вероятностных терминах. Один такт работы автомата есть испытание. За одно испытание выбирается один из девяти возможных шагов. Коэффициенты затухания в выражениях (8.5) и (8.9) для данного автомата приняты равными нулю, следовательно, испытания можно считать независимыми. Выбор одного $i$-го действия есть событие $A_i$. Поскольку выбор каждого действия за одно испытание равновероятен, проведем рассуждение относительно одного какого-либо действия. Тогда событие $A$ — выбор этого действия, событие $\bar{A}$ — выбор любого другого. Очевидно, вероятность наступления события $A$

$$p(A) = p = \frac{1}{9}, \tag{9.10}$$

а события $\bar{A}$ —

$$q(\bar{A}) = q = 1 - p = \frac{8}{9}. \tag{9.11}$$

Сформулируем задачу следующим образом. Требуется определить такое число испытаний $n$, чтобы с заданной вероятностью $r$ произошло не менее $m$ событий $A$, вероятность наступления каждого из которых в одном испытании равна $p$. Потребуем, чтобы $r = 0{,}9$. Требование получить не менее 6 выборов одного и того же шага равносильно неравенству

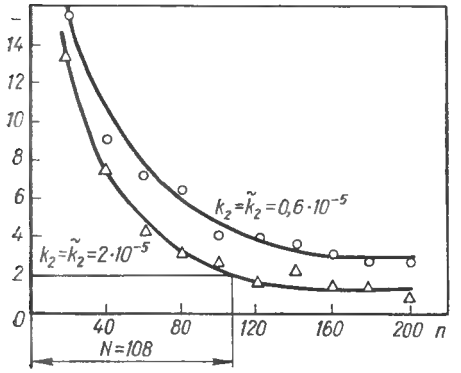
$$6 \leqslant m \leqslant \infty. \tag{9.12}$$

Для решения задачи применим интегральную теорему Муавра — Лапласа. Используя известные методики (например [20, стр. 219—222]), получим $n = 88$.

Поскольку с увеличением $n$ вероятность получения не менее 6 выборов одного шага может лишь возрасти, окончательно получим $n \geqslant 88$. Примем $N = 90$.

При исследовании автомата будем в качестве показателя степени его обученности $L$ рассматривать количество наказаний, полученных им за 30 последовательных шагов в среде. С целью получения статистически достоверного описания динамики обучения будем вычислять $L$ как среднее по 20 различным случайным средам. При случайном блуждании автомата без обучения математическое ожидание значения $L$ $M(L) = 30 \cdot 0{,}66 \simeq 20$.

Будем считать обучение автомата удовлетворительным, если за время, не превышающее $N = 90$ тактов, величина $M(L)$ будет уменьшена не менее чем на порядок, т. е. $M_{\text{финальное}}(L) \leqslant 2$.



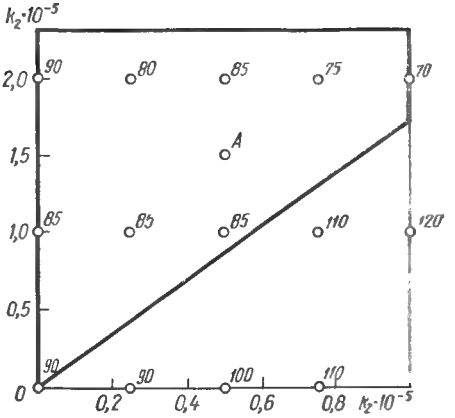




Рис. 75. Кривые обучения М-автомата.

Рис. 76. Область допустимых значений параметров проторения связей ($A$ — рабочие значения параметров).

Наложим ограничения на величины $k_2$ и $\tilde{k}_2$. Ограничение $\tilde{k}_2$ сверху можно получить, потребовав, чтобы за 6 повторений шага величина $\tilde{r}$ осталась меньшей или равной 1 (см. табл. 7). Поскольку значение коэффициента установления выбрано ранее и $k_0 = 2{,}5\cdot10^{-3}$, то значение $\tilde{r}$ после установления (по 8.8) составляет $\tilde{r}_{\text{нач}} = 0{,}625$. Далее, в течение пяти проб эта связь проторяется, так что, подставляя численные значения, получаем

$$\tilde{r}^{t=6} = \tilde{r}_{\text{нач}}\,(1 + 10^4\tilde{k}_2)^5. \qquad (9.14)$$

Из условия $\tilde{r}^{t=6} \leqslant 1$ находим

$$\tilde{k}_2 \leqslant 1\cdot10^{-5}. \qquad (9.15)$$

Легко видеть, что существует задача, в определенном смысле обратная рассмотренной,— задача «обучения овладению»; в ней рассматривается поведение автомата в среде, содержащей раздражители группы «пища», так что в случае, если автомат переходит в ячейку, занятую этим раздражителем, осуществляется его поощрение, т. е. возбуждается $i$-модель Пр. Проведенные выше рассуждения с очевидными изменениями справедливы и для такой обратной задачи. Аналогичным способом получим ограничение сверху и для $r$. Поскольку $k_0$ уже выбрано: $k_0 = 1{,}5\cdot10^{-3}$, то $\tilde{r}_{\text{нач}} = 0{,}375$. В ходе проторения получаем $r^{t=6} = r_{\text{нач}}(1 + 10^4 k_2)$ и из условия $r^{t=6} \leqslant 1$ находим

$$k_2 \leqslant 2{,}3\cdot10^{-5}. \qquad (9.16)$$

В качестве иллюстрации на рис. 75 приведены усредненные по 20 средам кривые обучения автомата при разных значениях $k_2$ и $\tilde{k}_2$. Начальные участки кривых обучения хорошо описываются выражением $L = n^a$ ($a$ — коэффициент), так что в логарифмических масштабах кривая обучения изображается прямой. Характеристика обучения $N$ — число шагов, сделанных автоматом до момента выполнения условия (9.13),— вычисляется как абсцисса точки пересечения прямых $\ln L = a \ln n$ и $\ln L = \ln 2$.

Перейдем к выбору области допустимых значений параметров $k_2$ и $\tilde{k}_2$. На рис. 76 представлено фазовое пространство параметров. Цифры возле точек указывают значения характеристики обучения $N$ при соответствующих значениях параметров. Видно, что условие $N \leqslant 90$ выполняется не для всех точек. Исключив из области значений, удовлетворяющих условиям (9.15) и (9.16), область, содержащую точки, для которых $N > 90$, получим область допустимых значений параметров $k_2$ и $\tilde{k}_2$. На рис. 76 эта область обведена жирной линией. В качестве рабочей выберем точку $A$, соответствующую значениям $k_2 = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ и $\tilde{k}_2 = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$.

## § 4. *Выбор значений параметров затухания связей. Задача повторения последовательностей*

Определим область допустимых значений параметров $\beta$ и $\tilde{\beta}$ в выражении (8.9).

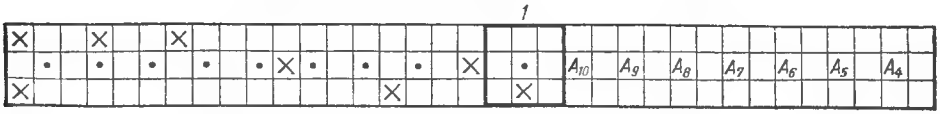
В исследуемом варианте М-сеть реализует следующие виды удержания следов внешних воздействий (памяти): а) память возбуждений — задается коэффициентом затухания возбуждений $\alpha$ (см. 8.2); б) память связей — задается коэффициентами $\beta$ и $\tilde{\beta}$ в (8.9). Память возбуждений соответствует простейшей форме памяти, связанной со временем переходных процессов, и может быть реализована в неадаптивных системах [56]. В таких системах при подаче на вход сигналов, следующих с интервалом, меньшим времени переходного процесса, реакции системы изменяются в связи с суперпозицией ответов на каждый сигнал. Процессы такого рода в М-сети уже исследованы. Память вида «б» соответствует памяти адаптивных систем, изменяющих свою структуру под действием входных сигналов на время, превышающее время переходных процессов, и, следовательно, способных к воспроизведению входных сигналов. Здесь мы имеем дело с более сложными формами памяти, соответствующими мнемоническим процессам в высших организмах.

Принято [42, 56] различать кратковременную оперативную и долговременную память человека. Оперативной памяти человека, характеризующейся ограниченным объемом и сравнительно небольшим временем удержания следа, поставим в соответствие память связей в М-сети. Ее параметры и исследуются в настоящем параграфе.

При изучении оперативной памяти часто используется эксперимент по воспроизведению последовательностей сигналов, предъявляемых испытуемому [37]. (Сигналами в различных методиках служат одно- и двусложные слова, бессмысленные слоги и т. п.) В этой области получен важный результат, состоящий в установлении того факта, что люди-испытуемые, как правило, в состоянии безошибочно воспроизвести предъявленную им последовательность в том случае, если она содержит не более $7 \pm 2$ сигналов. Этот результат проверен многими исследователями, что позволяет нам выбрать задачу воспроизведения последовательностей в качестве тестовой для настройки М-автомата. Параметры затухания связей выберем следующим образом. Построим вычислительную модель упомянутого эксперимента, используя в качестве «испытуемого» М-автомат с неопределенными параметрами $\beta$ и $\tilde{\beta}$. Далее, определим такую область значений параметров, в которой поведение автомата является удовлетворительным. В дальнейшем будем считать эту область областью допустимых значений параметров.

Известная методика проведения экспериментов по воспроизведению последовательностей модифицирована следующим образом. М-автомат помещался в среду (рис. 77), содержащую «нейтральные» для автомата раздражители. В качестве исходных выбирались ячейки, отмеченные на рисунке символами $A_4, \ldots, A_{10}$. Автомат выполнял 10 действий-шагов ($\leftarrow$). В описываемом эксперименте алгоритм $A_1$ был для удобства изменен так, что шаг ($\leftarrow$) выполнялся «через ячейку», так что, двигаясь из ячейки $A_{10}$, автомат последовательно занимал ячейки, отмеченные на рисунке точками. При этом последовательно воспринимались 10 различных ситуаций. Если движение начиналось из ячейки $A_9 (A_8, \ldots, A_4)$, количество воспринятых за 10 шагов ситуаций составляло соответственно $9 (8, \ldots, 4)$. После каждого шага алгоритм $B_{81t}$ ставил в соответствие воспринятой ситуации единственную $i$-модель из сферы «памяти ситуаций» и эта $i$-мо-

Рис. 77. Обучающая среда.



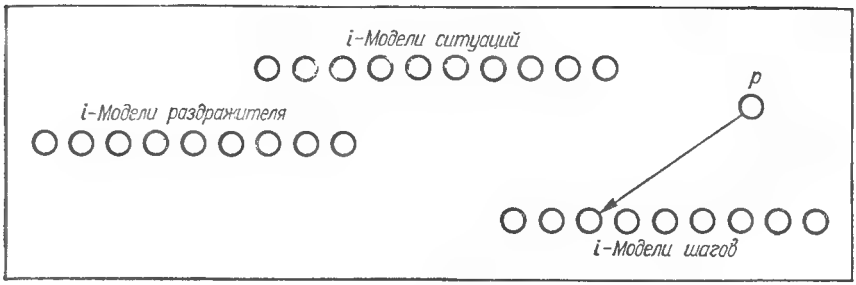



Рис. 78. М-сеть автомата.

дель получала дополнительное возбуждение. Таким образом, при движении автомата последовательно возбуждались 10(9, . . ., 4) $i$-моделей ситуации. После выполнения 10 шагов в структуре автомата оказывалась сформированной цепочка, аналогичная представленной на рис. 55, *а*. Затем специально введенный для данного эксперимента обслуживающий алгоритм предъявлял автомату ситуацию 1 (рис. 77). При этом возбуждалась первая из сформированных $i$-моделей ситуаций и возбуждение от нее передавалось по цепочке, вызывая соответствующие переключения СУТпс. Выделение СУТпс любой $i$-модели ситуации рассматривалось как «воспроизведение» соответствующей ситуации. Поведение автомата считалось удовлетворительным, если ситуации воспроизводились в том же порядке, что и воспринимались. Исходная структура автомата представлена на рис. 78 (формула $P^1_9C^1_{10}Д^1_92$); $p$ — вспомогательная $i$-модель.

Ранее обсуждалась роль асимметрии связей в организации процесса повторения последовательностей. Коэффициент $a_s$ в (8.11) целесообразно выбрать таким образом, чтобы обеспечиваемое им увеличение связи $R_{ij}$ составляло (при средних значениях параметров) 0,1—0,2 начального значения. Примем для дальнейшего $a_s = 0{,}002$.

Эксперименты проводились следующим образом. Автомат помещался в ячейку $A_{10}$, принималось $\beta = \tilde{\beta} = 1$ и проверялась правильность воспроизведения последовательности из 10 элементов. Затем проводились изменения $\beta$ и $\tilde{\beta}$, и для каждой пары их значений проверялась правильность воспроизведения. Далее автомат помещался в ячейку $A_9(A_8, \ldots, A_4)$, и описанные операции повторялись. Полученные результаты приведены на рис. 79. Штрихпунктиром обозначены верхние границы значений параметров, соответствующие ограничениям (8.9): $\beta \leqslant 1$; $\tilde{\beta} \leqslant 1$. Сплошными линиями обозначены полученные в эксперименте нижние границы областей, в которых выполняется правильное воспроизведение последовательностей. Цифры возле линий указывают длину последова-

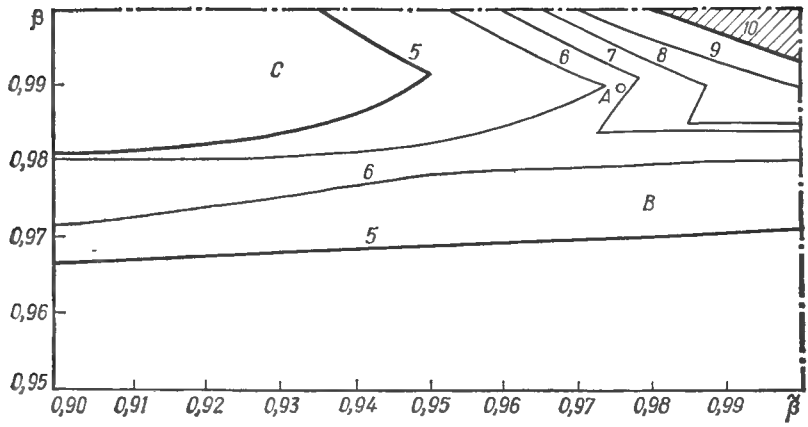



Рис. 79. Область допустимых значений параметров забывания связей ($A$ — рабочие значения параметров).

тельностей, правильное воспроизведение которых происходит в отграничиваемых областях. Так, на рисунке заштрихована область значений, в которой правильно воспроизводятся 10-элементные последовательности. Будем считать, что удовлетворительным поведением модели является повторение последовательностей длиной $7 \pm 2$. Тогда область допустимых значений параметров ограничивается снизу границей области повторения 5-элементных, а сверху — 10-элементных последовательностей. На рисунке эта область обведена жирной линией. В качестве рабочей примем точку $A$, соответствующую значениям

$$\beta = 0{,}99; \quad \tilde{\beta} = 0{,}975. \tag{9.17}$$

Следует отметить, что в случаях, когда последовательности воспроизводились неправильно, наблюдались ошибки двух типов. Так, для области повторения 5-элементных последовательностей в зоне, обозначенной на рисунке буквой $B$, характерными являлись ошибки типа «обрыв» — последовательность 1, 2, 3, 4, 5 воспроизводилась неполностью: 1, 2, 3. В зоне же $C$ характерными являлись ошибки типа «персевераций» — последовательность воспроизводилась в виде: 1, 2, 3, 2, 3, 4, 3, 4, ... с последующим «обрывом». Аналогичные явления наблюдались для областей повторения 6-, 7- и 8-элементных последовательностей. Можно предположить, что различие типов ошибок обусловливает и форму границ указанных областей (характерный «клин» зоны $C$). Представляется интересным подробно проанализировать процессы передачи возбуждений в цепочках при ее воспроизведении, однако

такой анализ достаточно сложен, никак не связан с задачей эмпирической настройки автомата и поэтому в данной работе не проводится.

В экспериментах по воспроизведению последовательностей людьми наблюдается обычно своеобразный «эффект начала»: независимо от успешности воспроизведения последовательности в целом первые ее элементы испытуемый воспроизводит правильно. Аналогичный эффект наблюдается и в экспериментах с М-автоматом. Кроме того, при многократных повторениях последовательности позже всего «забывались» элементы, предъявленные автомату первыми.

При построении модели двигательного поведения найденные выше значения параметров $\beta$ и $\tilde{\beta}$ должны использоваться в тех ее блоках, где целесообразно обеспечить возможность «последовательного вспоминания» прошлого опыта. Прежде всего это относится к блоку ПС. В блоке же понятийных обобщений, например, представляется более важным «свободное ассоциирование». Это означает, что значения $\beta$ и $\tilde{\beta}$ должны выбираться здесь из других соображений. Как указывалось выше, коэффициенты затухания связей определяют объем оперативной памяти системы. Потребуем, чтобы оперативная память обеспечивала сохранение в М-сети информации лишь о достаточно часто повторяющихся событиях. Пусть $T_0$ — среднее время повторения некоторых событий, а $r_н$ — начальное значение проходимости связей (в момент установления). Тогда, если некоторое событие произошло в момент $t$ и установилась связь $r^t = r_н$ и если в течение времени $T > T_0$ событие не повторилось, то проходимость $r^{t+T}$ не должна превышать некоторое малое значение $r_{min}$ (связь должна быть «забыта»). Примем $T = 2T_0$. Переменная $r_{min}$ имеет смысл числовой константы *gvs*, используемой алгоритмом $B_{VS}$. Пусть *gvs* = 0,02. Имея в виду среду, с которой предстоит работать модели двигательного поведения, примем $T_0 = 10$. Запишем наше требование следующим образом:

$$r_н \beta^{2T_0} \leqslant r_{min}. \tag{9.18}$$

Отсюда, подставляя числовые значения, получим

$$\beta \leqslant 0{,}86; \quad \tilde{\beta} \leqslant 0{,}84. \tag{9.19}$$

Таким образом, значения (9.17) обеспечивают запоминание последовательности событий, а значения (9.19) — запоминание событий, повторяющихся достаточно часто.

## § 5. *Исследование взаимодействия элементарных процессов обучения. Задача формирования понятий*

Выше были определены области допустимых значений всех основных параметров обучения. При этом мы стремились к тому, чтобы в каждом из тестов на работу М-автомата оказывали влияние лишь те параметры, значения которых в данном тесте подбирались. Так, в тестах, описанных в § 3, 4, использовались только те значения параметров установления связей, которые были выбраны ранее, в § 1. «Отключение» процессов проторения и затухания связей в этих тестах осуществлялось программно. Что касается остальных параметров, в большей или меньшей степени влияющих на поведение автоматов (значения порогов, коэффициентов и т. п.), то их значения принимались в соответствии с табл. 7 и оставались постоянными для всех моделей, описанных в данном разделе.

Проверим пригодность подобранных в тестах значений параметров при их совместном применении. Проверку желательно произвести на примере такого теста, который никак не связан с задачами, использованными при определении значений параметров. Для этой цели выбрана задача одновременного формирования трех сложных понятий. Выбор именно этой задачи продиктован следующими соображениями. Процесс формирования понятий широко изучается в психологии. Имеются хорошо апробированные методики экспериментального исследования этого процесса, которые позволяют получить характеристики соответствующего поведения человека в числовой форме, т. е. в форме, удобной для сравнения с характеристиками поведения модели. Большое значение имеет также то обстоятельство, что ряд известных объяснений [22, 31] процесса формирования понятий естественно интерпретируется в терминах М-сетей. Кроме того, если нам удастся показать, что процессы в М-сети обеспечивают феномен формирования понятий, то полученные при этом данные могут быть использованы для предварительной организации и задания характеристик соответствующего блока модели двигательного поведения.

Построим проверку следующим образом. Применяя одну из известных методик, проведем психологический эксперимент по формированию понятий. Далее, построим вычислительную модель этого эксперимента, используя в качестве «испытуемого» М-автомат. При этом будем пользоваться только теми значениями параметров обучения, которые получены в предыдущих параграфах. Затем проведем сравнение поведения автомата с поведением людей-испытуемых. Если результаты сравнения окажутся удовлетворительными,

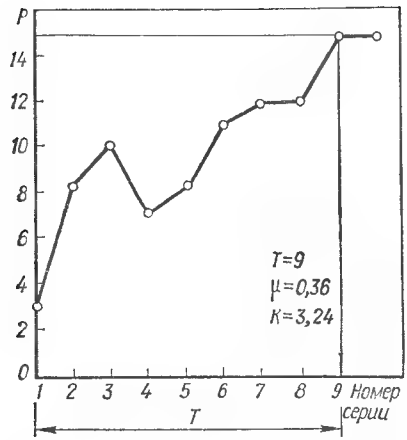



Рис. 80. Характерная кривая обучения человека-испытуемого.

будем считать удовлетворительными и найденные ранее значения параметров.

**Методика эксперимента.** Использованная в эксперименте одна из известных методик [73] модифицировалась для того, чтобы сделать ее удобной для дальнейшего представления в вычислительной модели; модификация заключалась в замене цифрами (в оригинальном варианте) геометрических фигур, цветовых знаков и т. п. Кроме того, эксперимент проводился в условиях дефицита времени.

Была подготовлена колода из 15 прямоугольных карт, на каждой из которых располагалась строка из шести цифр. Цифры помещались в строку в случайном порядке с одинаковыми для всех карт интервалами. Карты были разделены на три класса, по пять карт в каждом. В качестве названий классов использовались бессмысленные слова «пуно», «риду», «кема». Релевантным признаком каждого класса являлось наличие в строке двух определенных цифр. Колода тасовалась и карты последовательно предъявлялись испытуемому («серия»). После ознакомления с картой за время, не превышающее 1 *сек*, испытуемый должен был назвать класс, к которому принадлежит карта. Затем правильное название класса давал экспериментатор. После предъявления всех карт колода тасовалась и серия повторялась. Эксперимент оканчивался после первого правильного определения испытуемым принадлежности всех 15 карт. Фиксировалось количество правильных ответов $P$ в каждой серии. Кривая изменения $P$ в функции номера серии описывала ход процесса одновременного формирования трех сложных понятий.

Эксперимент проводился в два приема с 24 взрослыми испытуемыми обоего пола в возрасте 28—37 лет. В первой, предварительной, серии испытуемые осваивались с условиями

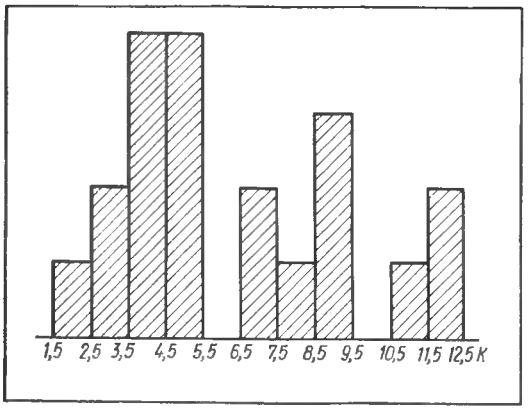



Рис. 81. Распределение $K=\mu T$.

эксперимента. Для проведения основной серии было отобрано 20 человек, не проявлявших в ходе эксперимента признаков эмоциональной напряженности или нежелания выполнять инструкцию. В проведении эксперимента принимали участие А. Н. Лук и И. А. Чепурнова.

**Результаты эксперимента.** Все испытуемые решили задачу успешно. Характерная кривая обучения схематически изображена на рис. 80. Каждый эксперимент описывался двумя параметрами: временем обучения $T$ и коэффициентом ошибки $\mu$. Смысл параметра $T$ ясен из рис. 80. Коэффициент $\mu$ есть отношение числа ошибок, сделанных испытуемым в ходе обучения, к числу проб. По данным эксперимента $\mu$ вычислялся следующим образом:

$$\mu = \frac{\sum_i (15 - P_i)}{15T}, \qquad i = 1, 2, \ldots, T. \tag{9.20}$$

Очевидно, $0 < \mu < 1$. В качестве общего параметра кривой обучения использовался коэффициент $K$, характеризующий среднее число ошибок, приходящихся на одну карту:

$$K = \mu T. \tag{9.21}$$

Чем быстрее и с меньшим числом ошибок проходит обучение, тем меньшим оказывается $K$. Значение $K$ для разных испытуемых изменялось в пределах 1,5—12,5. На рис. 81 представлена гистограмма распределения $K$. Видно, что по значению $K$ все множество испытуемых естественно разделяется на три группы, характеристики которых приведены в табл. 10.

Поскольку в дальнейшем предполагается сравнение результатов психологического эксперимента с модельным, введем правило отнесения кривых обучения к той или иной

группе. Для этого изобразим показанные испытуемыми результаты в виде точек в пространстве параметров $T$ и $\mu$ (рис. 82). Внутри каждой группы существует корреляция между $T$ и $\mu$ (коэффициенты корреляции приведены в табл. 10). Это обстоятельство позволяет ввести меру принадлежности произвольной точки к той или иной группе как расстояние от точки до линии регрессии этой группы. Тогда границы между группами представляют собой биссектрисы углов между линиями регрессии. На рис. 82 тонкими линиями показаны построенные стандартными методами [20] линии регрессии $T$ и $\mu$ для каждой из групп. Жирные линии обозначают принятые границы между группами.

Отметим следующее интересное обстоятельство. Во время кратких словесных отчетов, периодически проводимых в ходе эксперимента, испытуемые сообщали, например, следующее: «...всю серию обращал внимание только на кема...», или «...пуно уже знаю, искал только кема...». Последующий анализ протоколов показал, что в тех случаях, когда испытуемый «искал только кема», как правило, резко увеличивалось количество правильных узнаваний карт других классов, так что через одну-две серии предъявлений испытуемый неожиданно для себя «вдруг» выделял признак класса, на который будто бы не обращал внимания. Это наблюдение (сделанное А. Н. Луком) позволяет полагать, что ряд важных процессов обучения не осознается испытуемым. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что выбранная нами методика и техника проведения эксперимента блокирует способность испытуемых использовать при решении задачи специфические для такого рода деятельности интеллектуальные операции (различные стратегии поисков, мнемонические приемы и т. п.). Можно полагать, что здесь мы имеем дело с работой более простых механизмов, обеспечивающих способность к удержанию информации. Таким образом,

Таблица 10

| Номер группы | Значение $K$ | Число испытуемых в группе | $m(T)$ | $\sigma_T$ | $m(\mu)$ | $\sigma_\mu$ | $r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Менее 6 | 11 | 10,5 | 5,36 | 0,376 | 0,062 | $0{,}63 \pm 0{,}194$ |
| 2 | 6—10 | 6 | 18,3 | 1,73 | 0.214 | 0,085 | $0{,}95 \pm 0{,}04$ |
| 3 | Более 10 | 3 | 23,3 | 1 | 0.496 | 0,048 | $0{,}69 \pm 0{,}302$ |

*Примечание*: $m(x)$ — математическое ожидание $x$; $\sigma_x$ — среднеквадратичное отклонение $x$; $r$ — коэффициент корреляции $T$ по $\mu$

именно эта способность должна быть представлена в модели формирования понятий, которую нам предстоит построить.

**Модель формирования понятий.** В М-сетях удержание информации реализуется функциями установления и проторения связей между *i*-моделями внешних раздражителей. Для существующих в психологии и нейропсихологии объяснений процессов формирования понятий [31, 81] характерно представление о связях (условных, ассоциативных, нервных) между различными элементами исследуемой системы (отображениями стимулов, образами, очагами возбуждения). Речь идет о возникновении, закреплении и угасании этих связей. Используя литературные данные, приведем схематическое описание процессов, связанных с формированием понятий в М-автомате, моделирующем деятельность испытуемого при проведении описанного выше эксперимента.

В ходе эксперимента испытуемый оперирует образами цифр, их совокупностей и названиями классов. Соответственно, М-автомат должен содержать *i*-модели цифр от 0 до 9 и *i*-модели классов (рис. 83). При предъявлении испытуемому одной карты он воспринимает шесть изображенных на ней цифр. В М-автомате это соответствует возбуждению шести определенных *i*-моделей. Далее, испытуемый слышит правильное название карты, даваемое экспериментатором. В М-автомате этому соответствует возбуждение *i*-модели класса. Описанные процессы составляют одно предъявление. После предъявления в автомате оказывается выполненным условие установления, и между возбужденными *i*-моделями

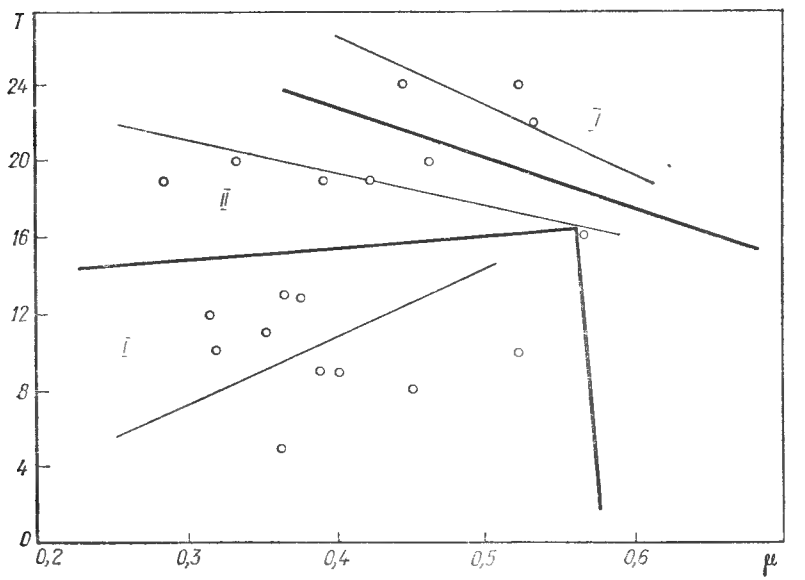



Рис. 82. Пространство решений.

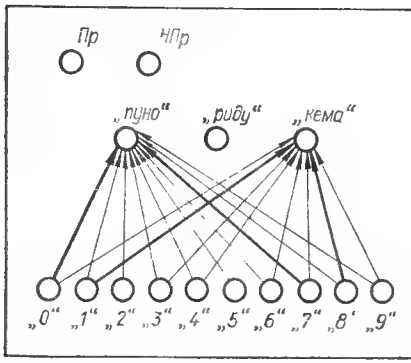



Рис. 83. М-сеть автомата.

устанавливаются связи. Наш эксперимент показал, что испытуемые не могут и не стремятся запоминать содержание определенных карт. Это позволяет пренебречь связями между $i$-моделями цифр, т. е. считать их проходимости достаточно малыми; можно также считать, что удержание информации осуществляется в основном за счет памяти связей и можно пренебречь влиянием временной памяти возбуждений. Таким образом, примем для всех $i$-моделей $\alpha_i = 0$.

Пусть автомату предъявлены подряд несколько карт одного класса. После каждого предъявления устанавливаются новые и проторяются имевшиеся ранее связи. В результате самыми проторенными окажутся связи, идущие от $i$-моделей наиболее часто встречающихся цифр, т. е. цифр, составляющих релевантный признак (см., например, рис. 83, где толщина линий, изображающих связи, пропорциональна их проходимости). При предъявлении карт другого класса наиболее проторенными окажутся связи между $i$-моделями релевантного признака этого класса и $i$-моделью его названия. Если теперь предъявить новую карту одного из этих классов, возбудив $i$-модели определенных цифр, и произвести пересчет возбуждений по имеющимся связям, то наибольшее возбуждение получит $i$-модель того класса, релевантные признаки которого имелись в карте. Это означает, что соответствующая $i$-модель будет выбрана СУТ, и мы сможем интерпретировать этот выбор как «правильное узнавание» автоматом предъявленной карты.

В описанном виде автомат имеет много общего с машинами условной вероятности, описанными Аттли [10] и позднее Штайнбухом и др. [66]. Дальнейшее развитие нашей модели связано с учетом реакций испытуемого на совпадение или несовпадение предложенного им названия карты с правильным названием.

Выделяются следующие однотипные этапы поведения испытуемого: 1) рассматривает предъявленную карту и узнает

ее; 2) после ответа экспериментатора проявляет эмоциональную реакцию, позитивную или негативную; 3) рассматривает предъявленную карту, уже зная ее правильное название. Последний этап соответствует как бы еще одному предъявлению карты и ее правильному узнаванию. (Об эмоциональных реакциях человека в аналогичных условиях см. также [55].)

В соответствии с приведенными описаниями и была построена программа, моделирующая эксперимент. Входная информация представлялась в виде таблицы из 15 строк, каждая из которых содержала шесть цифр и соответствовала одной карте в эксперименте. Была организована случайная выборка строк из таблицы и предъявление их автомату, структура которого соответствовала структуре на рис. 83. В исходном состоянии связи не задавались и первые ответы автомат выбирал случайным образом. В программу вводилась также информация о принадлежности карт классам. При правильном ответе возбуждалась $i$-модель Пр, при неправильном — НПр.

Структура программы поясняется блок-схемой на рис. 84. В блоке «установление» реализовывалась функция (8.8),

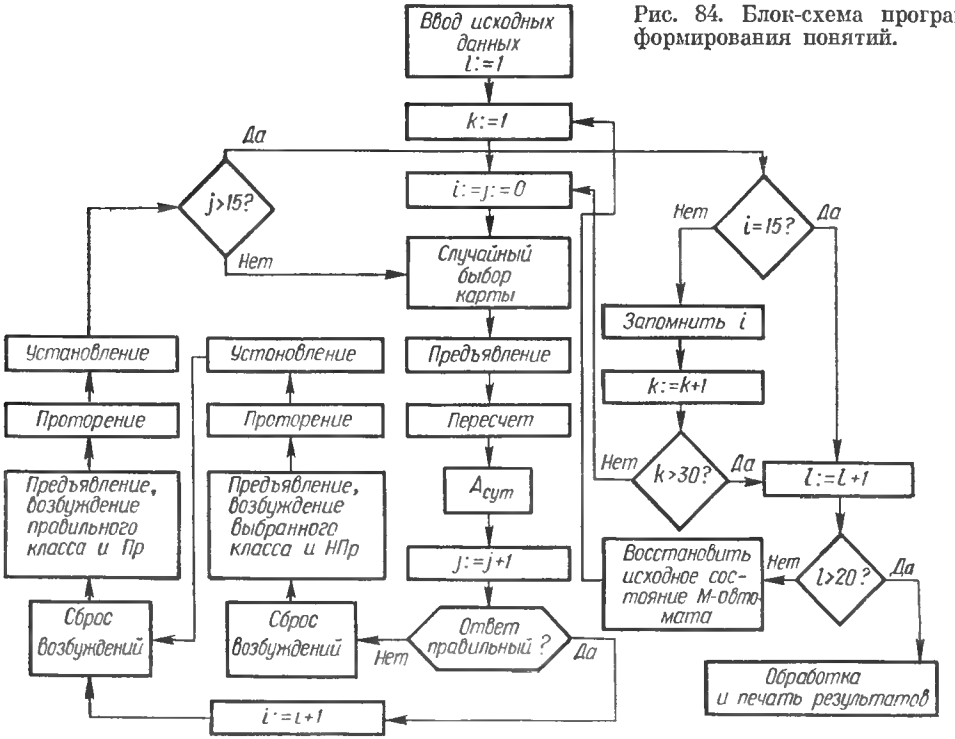



Рис. 84. Блок-схема программы формирования понятий.

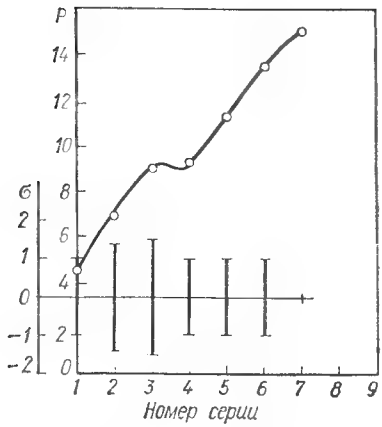



Рис. 85. Усредненная кривая обучения М-автомата.

«проторение» — функция (8.10), «пересчет» — функция (8.6). Значения параметров М-сети соответствовали величинам, определенным в § 1—4. На обучение автомата отводилось не более 30 серий предъявлений. Чтобы исключить влияние на результаты обучения последовательности предъявления карт в серии, кривая обучения определялась путем статистической обработки 20 экспериментов. Таким образом, кривая обучения автомата характеризует динамику величины математического ожидания числа правильных ответов в серии. Программа была записана на входном языке транслятора АЛГОЛ-БЭСМ и исследовалась на ЦВМ БЭСМ-6. Объем программы составлял $2000_8$ рабочих команд, время просчета модели — около 3 *мин*.

**Эксперименты с моделью.** На рис. 85 представлена кривая обучения автомата и ее среднеквадратичные отклонения. Значения параметров обучения соответствовали координатам точки $A$ на рис. 62, 76 и 79. В дальнейшем будем называть эту совокупность значений основным вариантом. Для кривой, изображенной на рисунке, $T = 7$; $\mu = 0{,}347$; $K = 2{,}43$. Представляющая точка автомата в пространстве параметров $T$ и $\mu$ принадлежит первой, наиболее представительной группе, однако не совпадает ни с одной из точек, представляющих людей-испытуемых.

Наблюдаемый в психологическом эксперименте разброс результатов может быть объяснен индивидуальными различиями в характере нервных процессов испытуемых, а также отличиями их мотивации при решении задачи. В терминах М-автомата эти различия могут быть интерпретированы в различия параметров обучения, т. е. коэффициентов установления, проторения и затухания связей, а также интенсивности возбуждения $i$-моделей Пр и НПр при правильных

и неправильных ответах. Чтобы показать правомерность этого утверждения, была предпринята попытка воспроизвести в модели кривые обучения испытуемых путем изменения указанных параметров.

Изменения проводились внутри определенных ранее областей допустимых значений. Полное исследование пространства параметров не являлось необходимым для решения поставленной задачи. Варьировались все основные параметры обучения и некоторые их совокупности. Характеристики ряда интересных в практическом отношении вариаций представлены в табл. 11. На каждом шаге изменения параметров проводилось 20 экспериментов с автоматом, кривые обучения усреднялись и по усредненной кривой вычислялись коэффициенты $T$ и $\mu$. Изменения $T$ и $\mu$ соответствуют перемещению представляющей точки автомата в пространстве (рис. 82). Каждая вариация, таким образом, может быть графически изображена в виде траектории представляющей точки в этом пространстве.

Вариации 1—8 проводились с целью изучения характера влияния отдельных параметров на процесс обучения. Соответствующие траектории представлены на рис. 86, *а*. Видно, что изменения отдельных параметров редко выводят представляющую точку за границы I группы. Обнаруживается

Таблица 11

| Номер вариации | Исходные значения параметров * | Варьируемые параметры | Шаг вариации ** | Результаты вариации (см. рис. 82) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $k_1 = k_0 = 0{,}0003$ | $k_1$, $k_0$ | 0,0003 | *а* |
| 2 | $\tilde{k}_1 = \tilde{k}_0 = 0{,}0005$ | $\tilde{k}_1$, $\tilde{k}_0$ | 0,0005 | *а* |
| 3 | $k_2 = 0$ | $k_2$ | 0,000004 | *а* |
| 4 | $\tilde{k}_2 = 0$ | $\tilde{k}_2$ | 0,000001 | *б* |
| 5 | $\beta = 0{,}975$ | $\beta$ | 0,005 | *а* |
| 6 | $\tilde{\beta} = 0{,}960$ | $\tilde{\beta}$ | 0,005 | *б* |
| 7 | $П_{Пр} = 0$ | Возбуждение Пр | 10 | *а* |
| 8 | $П_{НПр} = 0$ | Возбуждение НПр | 10 | *а* |
| 9 | $\tilde{k}_1 = \tilde{k}_0 = 0{,}004$ $П_{Пр} = 15$; $\tilde{\beta} = 0{,}960$ | Возбуждение Пр | 5 | *б* |
| 10 | $\tilde{k}_1 = \tilde{k}_0 = 0{,}0045$ $\tilde{\beta} = 0{,}995$ $П_{Пр} = 20$ | Возбуждение Пр | 10 | *б* |

* Приводятся значения параметров, отличные от основного варианта.
** Число шагов вариации 9.

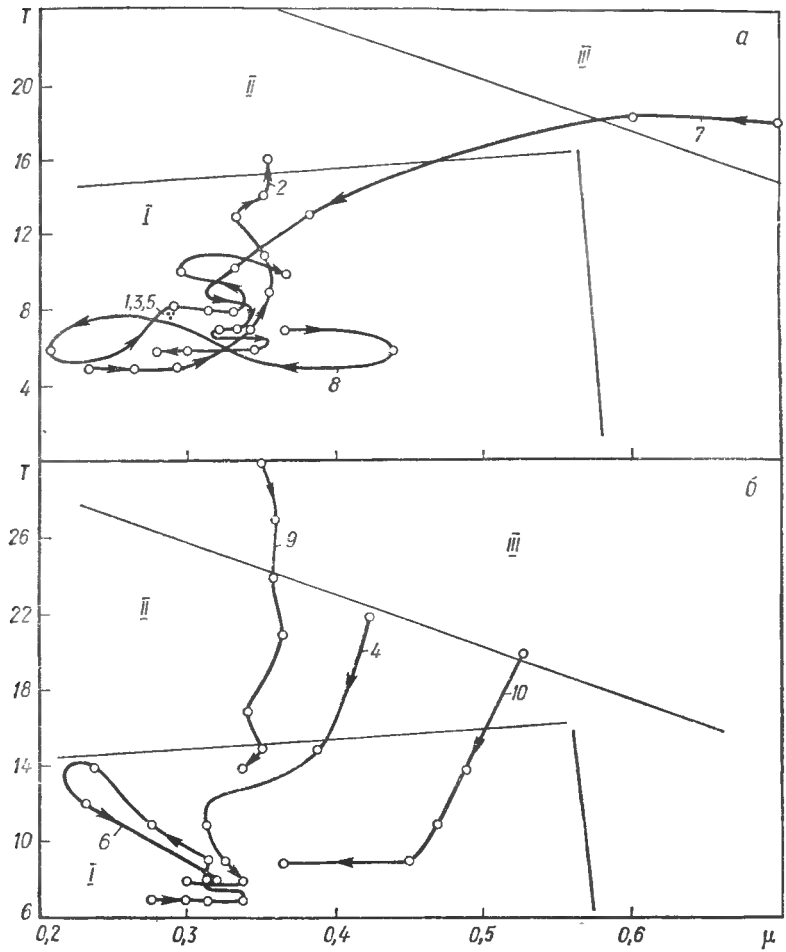



Рис. 86. Траектории представляющей точки М-автомата при изменении параметров.

также, что в области допустимых значений автомат некритичен к изменению каждого из параметров обучения усиливающих компонент связей — траектории вариаций 1, 3 и 5 суть точки.

На рис. 86, *б* приведены траектории вариаций 4, 6, 9, 10, переводящих рабочую точку в области пространства, соответствующие I, II и III группам. Таким образом, изменяя параметры обучения, можно совмещать показатели обучения автомата с показателями обучения испытуемых различных групп. Иначе говоря, разработанный М-автомат может быть использован в качестве модели испытуемых различных групп. Параметры, превращающие автомат в такие модели, приведены в табл. 12.

Представляет также интерес сопоставление кривых обучения автомата с кривыми обучения отдельных испытуемых. Это сопоставление проведено по данным испытуемых и автоматов I группы. Сравнивались кривые обучения людей и неусредненные кривые обучения автоматов. Сравнение показало, что кривые имеют одинаковый характер и в ряде случаев могут быть хорошо совмещены. В качестве примера на рис. 87 приведено шесть пар кривых обучений. В каждой паре одна кривая получена в эксперименте с человеком и одна — в эксперименте с автоматом (отмечены буквой М). Чтобы исключить субъективность в оценке совместимости кривых, был использован модифицированный критерий Тьюринга. Каждая пара кривых была предъявлена 10 лицам, знакомым с характером и результатами эксперимента (бывшим испытуемым), с просьбой указать «машинную» кривую. Всего, таким образом, наблюдалось 60 выборов. «Машинные» кривые были правильно названы в 24 случаях, что мало отличается от вероятного числа удачных выборов при случайном угадывании. Описанные выше результаты позволяют считать предложенную модель в целом адекватной экспериментальным данным.

Дальнейший анализ результатов экспериментального исследования модели связан с рассмотрением структуры М-сети, возникающей в ходе обучения автомата. Ниже приведена матрица связей, направленных от $i$-моделей признаков 1, 2, ..., 10 к $i$-моделям классов «пуно» (П), «риду» (Р), «кема» (К). Пара чисел на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца соответствует численному значению компонент $r_{ij}$ (в клетке вверху) и $\tilde{r}_{ij}$ (внизу) связи $R_{ij}$. Числа представляют собой среднеарифметические значения проходимостей, полученные при обработке 15 матриц, каждая из которых соответствовала одной реализации процесса обучения основного варианта модели. Разброс значений для всех связей характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения порядка 0,05—0,16.

Таблица 12

| Номер группы | Параметры М-автомата | | | | | | | | Характеристики обучения | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $k_0 \cdot 10^{-3}$, $k_1 \cdot 10^{-3}$ | $\tilde{k}_0 \cdot 10^{-3}$, $\tilde{k}_1 \cdot 10^{-3}$ | $k_2$ | $\tilde{k}_2 \cdot 10^{-3}$ | $\beta$ | $\tilde{\beta}$ | Возбуждение НПр | Возбуждение Пр | $m(T)$ $m(\mu)$ | $m_\mu$ |
| 1 | 1,5 | 2,5 | $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 0,5 | 0,99 | 0,975 | 50 | 100 | 10 | 0,36 |
| 2 | 4 | 2,5 | $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ | 0,5 | 0,99 | 0,98 | 40 | 50 | 21 | 0,355 |
| 3 | 4,5 | 2,5 | $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ | 0,5 | 0,99 | 0,999 | 20 | 50 | 20 | 0,525 |

| Номер признака | Классы | | |
|---|---|---|---|
| | П | Р | К |
| 1 | 1,27 0,096 | 0,153 0,338 | 0,13 0,41 |
| 2 | 0,52 0,11 | 0,222 0,229 | 0,2 0,244 |
| 3 | 0,2 0,218 | 0,275 0,224 | 0,461 0,219 |
| 4 | 0,106 0,318 | 1,03 0,107 | 0,236 0,298 |
| 5 | 0,138 0,256 | 0,73 0,11 | 0,218 0,304 |
| 6 | 0,13 0,362 | 0,45 0,212 | 0,49 0,201 |
| 7 | 0,089 0,33 | 0,41 0,212 | 0,732 0,118 |
| 8 | 0,107 0,358 | 0,295 0,288 | 0,841 0,115 |
| 9 | 0,428 0,151 | 0,224 0,314 | 0,282 0,208 |
| 10 | 0,183 0,321 | 0,341 0,31 | 0,375 0,219 |

Из структуры матрицы видно, что возбуждение $i$-го признака ведет к возбуждению $i$-моделей П, Р и К. При этом возбужденности последних в общем случае оказываются различными. Значимость $i$-го признака для возбуждения $i$-модели класса можно охарактеризовать величиной

$$\gamma_i^x = \frac{r_{xi}}{\tilde{r}_{xi}}. \qquad (9.22)$$

В табл. 13 приведены значения $\gamma$ для $i$-моделей признаков 1—10. Видно, что максимально значимыми для каждого класса оказываются его релевантные признаки (в таблице подчеркнуты). Это свидетельствует о том, что правильное отнесение карты к одному из классов осуществляется за счет преимущественного значения усиливающих компонент связей, направленных от $i$-моделей релевантных признаков к

$i$-моделям соответствующих классов. Из содержательного анализа процессов в автомате ясно, что наибольшее относительное возбуждение $i$-модели «правильного» класса при предъявлении некоторой карты может быть получено в случае, если значения тормозных компонент связей, направленных к $i$-моделям «неправильных» классов от $i$-моделей релевантных признаков, окажутся бо́льшими, чем значения усиливающих компонент этих связей. Следовательно, наиболее эффективной явится такая структура модели, для которой все, кроме подчеркнутых, значения $\gamma$ в 1, 2, 4, 5, 7 и 8-й строках табл. 13 будут удовлетворять неравенству $0 \leqslant \gamma \leqslant 1$. Из приведенной таблицы видно, что для структуры, полученной в эксперименте, это неравенство удовлетворяется не всюду. В частности, «недостаточно обученными» остались связи $R_{p7}$ и $R_{p8}$. Возможные причины этого явления будут проанализированы ниже.

Данные табл. 13 позволяют оценить «степень обученности» групп связей, направленных от $i$-моделей признаков к $i$-моделям П, К, Р. В момент установления связи $R_{ji}$ при-

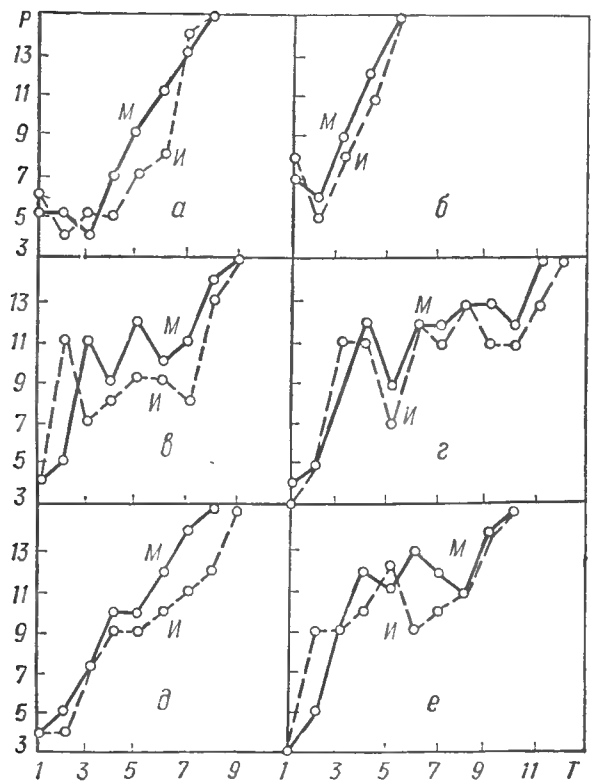



Рис. 87. Кривые обучения людей-испытуемых (И) и М-автоматов (М).

Таблица 13

| $i$-Модель признака | Значения $\gamma$ $i$-моделей классов | | |
|---|---|---|---|
| | П | Р | К |
| 1 | 13,4 | 0,452 | 0,317 |
| 2 | 4,72 | 0,97 | 0,819 |
| 3 | 0,916 | 1,23 | 2,1 |
| 4 | 0,333 | 9,6 | 0,793 |
| 5 | 0,546 | 6,62 | 0,718 |
| 6 | 0,359 | 2,14 | 2,44 |
| 7 | 0,27 | 1,93 | 6,19 |
| 8 | 0,3 | 1,02 | 7,3 |
| 9 | 2,83 | 0,714 | 1,35 |
| 10 | 0,57 | 1,1 | 1,71 |

знак $i$ приобретает некоторое начальное значение $\gamma_{0i}^{j}$. Поскольку все связи в момент установления равны, то, при принятых в основном варианте значениях параметров обучения, для всех $i$ и $j$

$$\gamma_{0i}^{j} = \gamma_0 = 0{,}6. \tag{9.23}$$

Используя начальное $\gamma_0$ и финальные (табл. 13) значения $\gamma$, введем для каждой связи меру обученности

$$\sigma_{ji} = |\gamma_i^j - \gamma_0|. \tag{9.24}$$

Среднюю обученность групп связей, направленных к $i$-моделям П, Р, К, определим как

$$\sigma_x = \frac{\sum\limits_i \sigma_{xi}}{10}. \tag{9.25}$$

При подсчете параметров (9.25) с целью выравнивания результатов не учитывались три признака, каждый из которых имел максимальное значение $\gamma$. Для исследуемой структуры получено:

$$\sigma_{\text{П}} = 0{,}73; \quad \sigma_{\text{Р}} = 1{,}05; \quad \sigma_{\text{К}} = 1{,}11. \tag{9.26}$$

Структура связей автомата формируется в основном под влиянием двух факторов: набора значений параметров обучения и структуры обучающего материала. Показанное выше совпадение поведений модели и испытуемых является косвенным свидетельством правильности выбора значений параметров обучения. Чтобы продемонстрировать это в явной

форме, необходимо показать адекватность структуры обучающего материала отражающей ее структуре М-сети автомата. Сделаем это следующим образом. Имея данную структуру обучающего материала, т. е. определенное размещение признаков на картах, можно определить информативность $I_i^0$ каждого из признаков. Анализируя приведенную выше матрицу, можно определить информативность $I_j^M$ каждой $i$-модели признака в М-сети. В случае, если информативности признаков и их $i$-моделей совпадают достаточно близко, будем считать, что М-сеть хорошо отображает обучающий материал. Определим необходимые понятия.

Информативность данного признака обратно пропорциональна числу карт $n$, в которых этот признак встречается. Информативность релевантных признаков естественно считать большей и обратно пропорциональной числу вхождений признака в карты, принадлежащие классам, для которых он не релевантен. Таким образом, информативность $i$-го признака определяется как

$$I_i^0 = \frac{15}{n} + \xi \frac{10}{n-5}, \tag{9.27}$$

где

$$\xi = \begin{cases} 1 \text{ для признака, релевантного какому-либо классу;} \\ 0 \text{ для признака, не релевантного никакому классу.} \end{cases}$$

Информативность $i$-модели некоторого признака относительно $i$-модели данного класса интуитивно оценивается по степени ее влияния, усиливающегося или тормозного, на $i$-модель этого класса. В соответствии с этим информативность $I_{ix}^M$ $i$-й $i$-модели признака относительно класса $x$ вычисляется как отношение большей компоненты связи $R_{xi}$ к меньшей компоненте этой же связи:

$$I_{ix}^M = \left( \frac{r_{xi}}{\tilde{r}_{xi}} \right)^{\delta}, \tag{9.28}$$

где

$$\delta = \begin{cases} 1 \text{ при } r_{xi} \geqslant \tilde{r}_{xi}, \\ -1 \text{ при } r_{xi} \leqslant \tilde{r}_{xi}. \end{cases}$$

Полная информативность $i$-модели признака $i$ в М-сети определяется в виде

$$I_i^M = I_{i\text{П}}^M + I_{i\text{Р}}^M + I_{i\text{К}}^M. \tag{9.29}$$

Таблица 14

| $i$-Модель признака | Информативность $I$ признаков и их $i$-моделей | | |
|---|---|---|---|
| | $I_i^M$ | $kI_i^M$ | $I_i^0$ |
| 1 | 18,77 | 6,5 | 5,2 |
| 2 | 6,97 | 2,42 | 3,03 |
| 3 | 4,42 | 1,53 | 1,67 |
| 4 | 13,86 | 4,85 | 3,17 |
| 5 | 9,84 | 3,41 | 3,5 |
| 6 | 7,37 | 2,53 | 1,87 |
| 7 | 11,82 | 4,1 | 3,5 |
| 8 | 11,65 | 4,04 | 3,5 |
| 9 | 5,58 | 1,93 | 1,87 |
| 10 | 4,56 | 1,58 | 2,14 |
| $k = \left(\sum_i I_i^0\right) : \left(\sum_i I_i^M\right) = 0{,}6$ | | | |

Значения $I_i^M$ нормировались путем умножения на коэффициент

$$K = \frac{\sum_i I_i^0}{\sum_i I_i^M}. \tag{9.30}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 14. Близость $I_i^0$ и $I_i^M$ оценивалась по критерию $\chi^2$. Для полученных данных значение $\chi^2$, рассчитанное стандартным способом, составило 2,16, что с высокой степенью достоверности ($p = 0{,}98$) позволяет считать информативности признаков и их $i$-моделей совпадающими. Таким образом, выбранные значения параметров обучения можно рассматривать как удовлетворительные.

Представляет интерес определение устойчивости $U$ решения задач моделью. Под устойчивостью понимается отношение количества правильно классифицированных карт к общему количеству предъявленных карт при неограниченном увеличении числа предъявлений. Определим нижнюю границу $U$. Пользуясь значениями $I_{ix}^M$, нетрудно подобрать для каждого из классов наиболее «трудные» карты, т. е. такие, которые содержат релевантные признаки данного класса и те из остальных признаков, сумма информативностей которых относительно других классов максимальна. Для класса П, например, такая карта будет содержать признаки 1,

2, 4, 6, 7, 10. Предъявим автомату эти (три) карты и оценим выполненные им в каждом случае решения параметром $\rho$, вычисляемым как отношение возбужденности $i$-модели «правильного» к максимальной возбужденности $i$-модели «неправильного» класса. Для классов П, Р, К этот параметр составил соответственно: $\rho_{\text{П}} = 0{,}64$, $\rho_{\text{Р}} = 1{,}32$ и $\rho_{\text{К}} = 1{,}32$. Это означает, что для класса П ответ был дан неправильно и, следовательно, среди всех возможных карт класса П имеются такие, которые будут классифицированы неверно. Любые же карты классов Р и К будут распознаваться правильно. Таким образом, нижняя граница $V$ лежит не ниже 0,66 или, грубо, $U \geqslant 0{,}7$.

Следует отметить, что между вычисленными выше числовыми характеристиками элементов анализируемой структуры и результатами психологического эксперимента имеются определенные соответствия. Так, из табл. 15 видно, что максимальной информативностью обладает признак 1. Анализ протоколов эксперимента показывает, что именно этот признак анализировался испытуемым в первую очередь. Далее, как показано выше, минимальному обучению подвергалась группа связей, направленных к $i$-модели класса П ($\sigma_{\text{П}} = 0{,}73$), причем отношение

$$\frac{\sigma_{\text{Р}}}{\sigma_{\text{П}}} \approx \frac{\sigma_{\text{К}}}{\sigma_{\text{П}}} \approx 1{,}5. \tag{9.31}$$

Можно предположить, что чем меньше $\sigma_x$, тем быстрее заканчивается обучение и тем раньше испытуемые обучаются правильно распознавать класс $X$. Анализ протоколов показал, что среднее время $T_{\text{ср}}$ обучения испытуемых правильному распознаванию классов П, Р, К составляет соответственно: $T^{\text{П}}_{\text{ср}} = 10$; $T^{\text{К}}_{\text{ср}} = 16{,}6$; $T^{\text{Р}}_{\text{ср}} = 16{,}6$. При этом

$$\frac{T^{\text{Р}}_{\text{ср}}}{T^{\text{П}}_{\text{ср}}} = \frac{T^{\text{К}}_{\text{ср}}}{T^{\text{П}}_{\text{ср}}} = 1{,}66, \tag{9.32}$$

что хорошо совпадает с аналогичным отношением для модели. Интересно, что завершившееся наиболее легко обучение класса П оказалось для модели и самым неустойчивым ($\rho_{\text{П}} = 0{,}64$).

Особо следует остановиться на следующем обстоятельстве. Эксперимент показал, что как только испытуемый выделяет релевантные признаки двух каких-либо классов, он начинает относить к третьему классу все карты, не содержащие известные ему признаки. Обучение заканчивается, таким образом, в момент определения признаков двух, а не трех классов. Этим, в частности, можно объяснить равенство

параметров $T_{ср}^{Р}$ и $T_{ср}^{К}$. Типичные для большинства испытуемых процессы обучения можно описать в этом случае следующим образом. Вначале выделяется класс П как содержащий наиболее информативные (в сумме) релевантные признаки. Как только эти признаки выделены, испытуемые анализируют классы Р и К, причем для обоих классов процесс развивается параллельно, независимо от того, осознан он или нет. В какой-то момент определяется один из классов и обучение заканчивается.

Предположим теперь, что процесс обучения в модели развивается по той же схеме. Вначале анализ всех трех классов идет параллельно: в модели не реализован механизм сознательного выбора объекта анализа. Анализ класса П заканчивается первым (по тем же причинам, что и у людей-испытуемых), и с этого момента соответствующая часть структуры изменяется мало (это обусловлено структурой алгоритмов обучения — см. рис. 84). Поэтому $\sigma_П < \sigma_К$ и $\sigma_П < \sigma_Р$. Происходит дальнейший параллельный анализ классов Р и К. В какой-то момент заканчивается анализ класса, например К, и следовало бы ожидать, что дальнейшая работа связана с продолжением анализа Р. Однако этому противоречит равенство $\sigma_Р \approx \sigma_К$, что заставляет предположить, что с окончанием анализа класса К закапчивается и обучение вообще. Об этом же свидетельствуют равенство $\rho_Р = \rho_К$ и отмеченная раньше «недостаточная обученность» связей в классе Р от его релевантных признаков (определенная по параметру $\gamma$). Таким образом, возникает предположение о том, что М-сеть автомата в неявной форме реализует некоторое правило, сходное по своему влиянию на ход обучения с правилом, используемым испытуемыми. Это предположение, очевидно, не является достаточно обоснованным, однако позволяет объяснить ряд совпадений числовых характеристик модели.

В ходе экспериментов с программой был обнаружен и ряд ограничений, присущих модели. Это, в частности, касается воспроизведения автоматом кривых обучения испытуемых III группы. Для последних характерно большое время обучения ($T > 20$), значительную часть которого количество правильных ответов за серию колеблется в пределах 4—7. В случаях же $T > 20$ для М-автомата бо́льшую часть времени обучения количество правильных ответов за серию составляет 10—12. Это приводит к тому, что коэффициент $\mu$ для автоматов III группы меньше, чем для людей-испытуемых. В тех случаях, когда подбором параметров удается увеличить $\mu$, часто обнаруживается эффект «растягивания» верхней части кривой (в ряде заключительных серий количество ответов близко к 15), который у людей-испытуемых наблюдался весьма редко. Эти ограничения указывают на

определенную неполноту модели. Однако удовлетворительные результаты моделирования испытуемых I и II групп (17 человек из 20) позволяют использовать полученные результаты при дальнейшей работе.

Описанный эксперимент подтверждает правомерность предложенной интерпретации индивидуальных различий испытуемых как различий некоторых параметров обучения М-автомата. Поскольку в основу модели положены соображения относительно вида информационных процессов в коре, то можно полагать, что она является моделью испытуемого, а не конкретного эксперимента и, следовательно, должна давать удовлетворительные результаты в широком классе методик этого эксперимента. (Обычно математическая модель психологического эксперимента описывает только одну методику. Например, модель, разработанная для случая одновременного формирования двух понятий, не является моделью формирования трех, четырех и т. д. понятий [9].) Проверим это предположение.

Не изменяя полученных выше характеристик М-автомата, используем его в качестве «испытуемого» при проведении эксперимента по формированию двух понятий. Рассмотрим также имеющиеся в литературе данные («эталонные») аналогичного психологического эксперимента. Далее, применим к обеим группам данных одну из известных частных моделей формирования двух понятий. Если предсказания этой частной модели относительно эталонной группы данных хорошо совпадут с аналогичными предсказаниями относительно поведения М-автомата, мы будем иметь основания считать, что М-автомат является адекватной моделью формирования понятий при различных методиках эксперимента.

В качестве эталонных приняты данные, полученные Бауэром и Трабассо [72]. Их эксперимент по формированию двух понятий проведен с 46 испытуемыми. Стимулами служили изображения геометрических фигур, представляющих собой вариации шести признаков. Задача считалась решенной при получении 10 правильных ответов подряд.

Для модельного эксперимента была использована описанная в настоящем параграфе программа. Изменения касались входной информации, которая соответствовала здесь 100 картам с шестью признаками (цифрами) на каждой. Карты разделялись на два класса по релевантному признаку, состоящему из трех цифр. Значения параметров обучения соответствовали основному варианту. Чтобы обеспечить статистическую достоверность результатов, эксперимент был проведен со 100 М-автоматами (т. е. со 100 «испытуемыми»), которые отличались друг от друга значениями $\beta$ и $\tilde{\beta}$. Эти параметры менялись для различных автоматов в пределах 0,895—0,995.

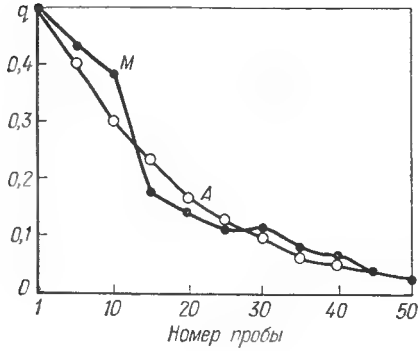



Рис. 88. Теоретическая ($A$) и экспериментальная ($M$) кривые обучения М-автомата двум понятиям.

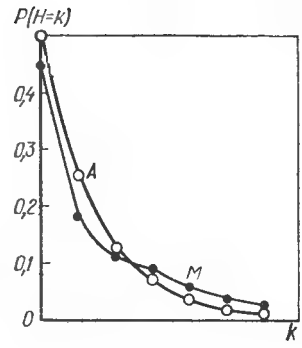



Рис. 89. Теоретическое ($A$) и экспериментальное ($M$) распределение числа правильных ответов, попадающих между соседними ошибочными.

Эксперимент с каждым автоматом проводился до получения 10 правильных ответов подряд.

В качестве частной описывающей модели была принята модель, разработанная и проверенная Р. Аткинсоном и др. Ее описание приведено в работе [9, стр. 52—103]. Там же показано, что предложенная модель весьма удовлетворительно предсказывает результаты Бауэра и Трабассо. Рассмотрим ее предсказания относительно результатов, полученных в эксперименте с М-автоматами.

Среднее по 100 автоматам количество ошибок за эксперимент составило 9,23. Это число используется в модели Аткинсона для предсказания характеристик экспериментального материала. С его помощью был рассчитан ряд таких характеристик. Те же характеристики были определены путем обработки эмпирического материала, полученного в эксперименте с автоматами. Приведем результаты их сравнения.

1. Вероятность ошибки в $n$-й пробе ($q_n$). Выражение для $q_n$ характеризует процесс обучения группы испытуемых. На рис. 88 приведена кривая обучения, предсказанная моделью Аткинсона ($A$), и экспериментальная кривая ($M$), полученная при исследовании 100 автоматов. Оценка согласованности кривых по критерию Пирсона дает значение $\chi^2 = 4{,}1$ при 10 степенях свободы, что позволяет считать наблюдаемые расхождения несущественными и отнести их за счет случайных причин.

2. Номер пробы, соответствующий последней ошибке ($L$). Модель Аткинсона предсказывает значение математического ожидания $L$, равное 18,5 при среднеквадратичном отклонении 18. В результате обработки экспериментальных данных найдено, что среднее значение $L$ равнялось 20,4, а среднее квадратичное — 19,1. Таким образом, теоретически предсказанные числа удовлетворительно совпадают с наблюдаемыми в эксперименте.

3. Распределение числа правильных ответов, попадающих между соседними ошибочными ответами ($H$). На рис. 89 показаны теоретическое ($A$) и эмпирическое ($M$) распределения $H$. Оценка степени согласованности распределений по критерию Колмогорова дает $\rho(\lambda) = 1$ (при $\lambda = 0{,}25$), что позволяет считать имеющиеся расхождения несущественными.

Из приведенных данных видно, что модель Аткинсона, хорошо описывающая поведение людей-испытуемых при формировании двух понятий (эталонные данные), хорошо описывает также и поведение в аналогичных условиях М-автомата. Показано также, что автомат вырабатывает адекватное поведение в различных экспериментах без специальной перенастройки. Построенная нами модель, таким образом, обладает определенной общностью и может рассматриваться как правомерное описание информационных процессов, реализуемых мозгом в ходе деятельности по формированию понятий описанного типа. Основным результатом изложенных в настоящем параграфе работ является заключение о том, что выбранные (в § 1—3 настоящей главы) значения параметров обучения можно считать удовлетворительными.

## § 6. *Обсуждение результатов*

Целью описанных в этой главе исследований являлось решение следующих задач: а) выбор значений существенных параметров в выражениях, задающих систему (9.33); б) отладка основных алгоритмов модели; в) рассмотрение возможностей моделирования относительно простых психических функций с помощью предложенного аппарата; г) получение некоторых дополнительных данных для построения основного варианта модели. Рассмотрим с этих позиций результаты исследования описанных выше моделей.

*Модель обучения избеганию наказаний.* Задача, решаемая этой моделью, широко применяется в качестве теста при исследовании свойств обучающихся автоматов. Ряд авторов [34, 48] указывают на важность этой задачи при решении некоторых проблем автоматического управления. Обычно она формируется как задача минимизации суммы штрафов, получаемых автоматом в случайных средах. Мы использовали геометрическую интерпретацию этой задачи (случайные блуждания автомата в среде, содержащей случайно расположенные раздражители), более удобную для наших целей. Основным результатом исследования модели обучения избеганию наказаний является определение области допустимых значений коэффициентов проторения связей М-сети.

Существенные результаты в исследовании задачи минимизации штрафов получены М. Л. Цетлиным [63] и его последователями. Нетрудно видеть, что структура и алгоритмы предложенной модели плохо описываются на языке развитой ими теории автоматов с линейной тактикой. Особые трудности возникают при описании функций СУТ. Предложенный М-автомат не содержит каких-либо специальных алгоритмов, обеспечивающих решение задачи. Способность к обучению в случайных средах заложена в основных свойствах М-сети.

Исследование модели показало, что М-автомат способен устанавливать «условнорефлекторные» связи между *i*-моделями «раздражителей» и действий, а также позволило изучить конфигурацию и параметры этих связей. Это дает возможность включить указанные конфигурации в структуру основного варианта модели двигательного поведения на этапе ее предорганизации. Будем полагать, что основной вариант уже имеет некоторый «опыт» действий, зафиксированный вводимыми связями. По аналогии будем также задавать связи между *i*-моделями раздражителей и «активных» действий («есть», «спать» и др.).

*Модель повторения последовательностей.* Представляет собой модель хорошо изученной психической функции. Основной целью ее построения и результатом исследования является определение области допустимых значений коэффициентов затухания связей М-сети.

Существенную роль в организации функций модели играет вспомогательный алгоритм асимметрии связей $B_{as}$. Этот алгоритм имеет весьма малый объем, поскольку выполняет лишь корректирующую функцию свойств М-сети, обусловленных ее основными операторами. Подбором некоторых коэффициентов ($\beta$, $\tilde{\beta}$) параметры поведения модели легко приводятся в соответствие с параметрами моделируемого процесса. При повторении последовательностей моделью наблюдается ряд особенностей, характерных и для людей-испытуемых (плохое воспроизведение последовательности «назад», эффект начала, персеверации и др.). Это дает основание считать свойства модели адекватными свойствам моделируемого объекта.

Исследование модели позволило определить значения параметров $\beta$, $\tilde{\beta}$, обеспечивающие феномен запоминания «истории» возбуждений в М-сети. Отработка модели проведена на сети, соответствующей блоку «памяти ситуаций» основного варианта модели. Полученные результаты могут, однако, применяться и в других блоках, где целесообразно обеспечить запоминание последовательностей. В частности, эти результаты будут использованы при предорганизации блока «решений».

*Модель формирования понятий.* На примере задачи формирования простых понятий мы должны показать пригодность всех выбранных ранее параметров обучения при совместном их использовании. Положительное решение этой задачи и составляет основной результат исследования модели.

Задача моделирования процесса формирования понятий ставилась многими авторами и в разных вариантах [9, 10, 54, 62]. Интерес к ней обусловлен тем обстоятельством, что модель формирования понятий может быть использована при решении как некоторых психологических задач, так и ряда задач практического характера. Принятая нами постановка задачи имеет специфику, заключающуюся в том, что моделировались психические процессы, развивающиеся (предположительно) при решении задачи в строго определенной экспериментальной ситуации. Такая постановка, во-первых, упрощает задачу моделирования и, во-вторых, дает достаточный материал для решения основного вопроса — о совместимости найденных параметров обучения.

Результаты исследования позволяют сделать заключение об адекватности модели. При этом обнаруживаются следующие интересные моменты.

1. Модель одновременного формирования трех понятий выполнена в виде М-автомата, погруженного в специфическую среду конкретного эксперимента. Удовлетворительный режим функционирования автомата был получен за счет использования основных свойств М-сети. Все перенастройки модели проводились путем изменения значений параметров обучения. При этом удалось совместить характеристики обучения модели с аналогичными характеристиками людей-испытуемых.

2. Не потребовалась перенастройка автомата и в случае использования его в режиме работы по формированию двух понятий. Это обстоятельство позволяет полагать, что предложенный М-автомат может рассматриваться в качестве удовлетворительной модели испытуемого, занятого решением задач описанного класса. Этот вывод представляет определенный интерес, поскольку известные модели аналогичного типа [9] строятся как модели экспериментальных результатов, полученных в рамках строго определенной методики. Такие модели теряют адекватность при изменении методики эксперимента. В частности, известные модели формирования трех понятий уже не могут использоваться для описания результатов эксперимента по одновременному формированию двух понятий.

В ходе экспериментального исследования модели изучены конфигурации связей, возникающих в М-автомате в процессе выработки понятий, и установлены параметры связей. Полученные результаты естественно распространяются на

случай формирования многоуровневых структур, отображающих родо-видовые отношения понятий. Их можно, таким образом, использовать при задании предорганизации блока понятийных обобщений в основном варианте модели. Задавая связи, отражающие отношения включения на множестве $i$-моделей различных «понятий» этого блока, мы тем самым зададим автомату некоторую начальную систему «знаний» об объектах окружающего его мира. При функционировании модели эти «знания» будут подвергаться коррекции и пополняться за счет установления новых «ассоциативных» связей.

Таким образом, в ходе работ, описанных в настоящей главе, были решены такие задачи: выбраны области допустимых значений параметров обучения; отлажены все основные блоки алгоритма $A$; получены сведения, необходимые при задании предорганизации М-сети основного варианта модели двигательного поведения. Кроме того, исследованы возможности М-сети при моделировании некоторых психических функций. При этом установлено следующее.

1. М-сеть является достаточно гибким средством моделирования, поскольку оказалось возможным, используя ее основные свойства и не вводя какие-либо специальные меры, построить ряд моделей некоторых психических функций, существенно отличающихся друг от друга по характеру и способам проявления. Отметим, что при построении различных моделей в разной степени использовались блоки алгоритма $A$. Предварительный анализ показывает, что использование $A$ в полном объеме не меняет существенно результатов, полученных в каждой из моделей. Полностью этот вопрос, однако, не исследовался. Его решение, тем не менее, не влияет существенно на сделанный вывод, так как, используя любую часть алгоритма $A$ или любое сочетание его частей, мы по-прежнему используем «языковые средства» рассматриваемого метода моделирования.

2. М-сеть является достаточно эффективным средством моделирования, поскольку позволяет использовать при построении действующих моделей не только количественные, но и качественные сведения об объектах; допускает представление информации в наглядной и легко обозримой форме; обеспечивает простоту корректирования моделей путем изменения лишь отдельных ее параметров (обучения, порогов и т. п.), без перестройки модели в целом.

До сих пор, однако, мы имели дело со сравнительно простыми моделями. Более интересный случай — использование М-сети при построении достаточно сложного автомата — будет рассмотрен в следующей главе на примере экспериментального исследования основного варианта модели двигательного поведения. Формальная постановка задачи моделирования двигательного поведения в общем виде приведена в

работе [6]. Здесь мы рассмотрим некоторые дополнительные сведения, необходимые для дальнейшего изложения. В [6] описаны структура и способ задания абстрактной системы М, организующей поведение в некоторой среде $P$. Среда может быть представлена в виде ненаправленного связного конечного графа $G$, каждая вершина $g_i$ которого сопоставляется с определенной областью «жизненного пространства» системы М. Упомянутые области содержат наборы объектов, воспринимаемых системой и являющихся раздражителями для нее.

Система функционирует в дискретном времени. Вершину $g_i$ графа $G$, в которой система М находится в момент $t$, будем называть собственной (в момент $t$) вершиной. Собственную вершину и множество соседних, соединенных с ней ребрами вершин будем называть окрестностью системы (в момент $t$). Система М может воспринять раздражители, имеющиеся в ее окрестности, и распознать их.

Будем выделять в системе М следующие подсистемы: $MV$, ответственную за восприятие информации об окрестности системы; $MP$, осуществляющую хранение и переработку воспринятой в $MV$ информации; $MD$, формирующую последовательность действий как результат переработки информации в $MP$; $ME$, формирующую оценки функционирования системы М.

Задание М сводится к заданию следующей системы функций:

$$\left.\begin{array}{ll} S_t = \Phi_1(P, g_i) & \text{— функция восприятия,} \\ C_t = \Phi_2(c_{t-1}, S_t, e_t, g(g_i, g_{\text{ц}})) & \text{— функция переработки,} \\ d_t = \Phi_3(c_t, e_t) & \text{— функция принятия решений,} \\ e_t = \Phi_4(e_{t-1}, c_t, S_t) & \text{— функция оценки.} \end{array}\right\} \quad (9.33)$$

Здесь $g_i$ — собственная (в момент $t$) вершина; $S_t$ — воспринятая ситуация, т. е. состояние $MV$ после восприятия раздражителей из окрестности $g_i$; $c_t$ — состояние в момент $t$ подсистемы $MP$, $c_t \in C = \{c_1, c_2, \ldots\}$; $e_t$ — текущее значение оценки, вырабатываемой подсистемой $ME$,— численная величина, лежащая в границах между $(-A)$ — «максимально плохо» и $(A)$ — «максимально хорошо» ($A$ — const); $g(g_i, g_{\text{ц}})$ — функция цели, числовое значение которой определяется «близостью» текущего $(g_i)$ положения системы в среде к заданному $(g_{\text{ц}})$; $d_t$ — действие, выполняемое системой в момент $t$; $d_t \in D = H \times V$, где $H$ — множество «шагов», перемещающих М из $g_i$ в одну из вершин окрестности; $V$ — множество «воздействий» («активных действий»), изменяющих расположение раздражителей в среде.

Введем показатель качества функционирования системы М. Пусть система функционирует $T$ моментов времени начиная с момента $t = 1$, причем тем лучше, чем больше величина

$$e = \sum_{t=1}^{T} e_t. \tag{9.34}$$

Очевидно, что значение $e$ определяется видом функций (9.33), задающих систему. Существует множество возможных видов этих функций. Конкретный вид функций назовем вариантом задания системы М и будем рассматривать упорядоченное некоторым образом множество таких вариантов, т. е. вектор вариантов $\overline{m}$. Пусть на входе системы имеется случайная последовательность ситуаций $\{S[t],\ t = 1, 2, \ldots\}$, а $\overline{S}$ — вектор случайных последовательностей. Таким образом, величина $e$ есть функционал вектора вариантов $\overline{m}$, зависящий также от вектора случайных последовательностей $\overline{S}$. Выражение (9.34) можно записать следующим образом:

$$e = Q(\overline{S}, \overline{m}). \tag{9.35}$$

В общей форме показатель качества функционирования системы М запишем в виде

$$I(\overline{m}) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} Q(S[t],\ \overline{m}). \tag{9.36}$$

Наилучший, оптимальный, вариант задания системы соответствует максимуму показателя качества $I(\overline{m})$. Следовательно, процесс оптимизации системы состоит в нахождении такого варианта ее задания, при котором алгебраическая сумма оценок, выработанных блоком $ME$ за фиксированный (достаточно большой) промежуток времени в данной среде, оказывается максимальной. Для того чтобы задача оптимизации имела смысл, необходимо наложить определенные ограничения на векторы $\overline{m}$ и $\overline{S}$. Вид этих ограничений обусловлен выбором конкретного способа задания системы М с помощью М-автомата. Ряд таких ограничений обсуждался выше, в гл. 5.

Поскольку настоящая работа имеет бионическую направленность, потребуем, чтобы модель удовлетворяла дополнительным требованиям.

Среда $P$ является аналогом определенного класса естественных сред. Будем рассматривать двигательное поведение испытуемого (человека или животного) в среде из этого класса. Пусть испытуемый пытается достичь некоторой точки в среде. В зависимости от типа нервной деятельности и прошлого опыта различные испытуемые построят различ-

ные поведения, образующие множество $N^e = \{n_1^e, n_2^e, \ldots\}$, которое может быть исследовано экспериментально.

Сопоставим ход мышления человека-испытуемого с определенной последовательностью переходов из состояния в состояние системы М. Пусть каждой последовательности переходов может быть единственным образом поставлена в соответствие последовательность слов в естественном языке. Назовем такую последовательность слов «ходом мышления» системы М. Располагая сведениями о среде, поведении и «ходе мышления» системы М, человек-экспериментатор может судить о рациональности ее «хода мышления». Необходимо построить модель двигательного поведения так, чтобы, во-первых, поведение $n^M$ системы М соответствовало некоторому «естественному» поведению $n_i^e \in N^e$ и, во-вторых, «ход мышления» системы М был рационален.

*Глава 10*

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЬЮ ДВИГАТЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ**

## § 1. *Дополнительные сведения о модели МОД*

Работы по определению значений параметров обучения составили первый этап исследования модели. Второй его этап связан с экспериментальным изучением свойств модели, представленной в полном объеме. Изложению экспериментальных результатов следует предпослать более детальное описание структуры исследуемой модели и некоторых ее механизмов, не описанных ранее.

В организации поведения существенную роль играют процессы, связанные с построением предварительного плана действий. Моделирование двигательного поведения было бы неполным без разработки специальной модели процессов планирования. М-автомат МОД рассчитан на взаимодействие с такой моделью. Поскольку ее описание содержится в предыдущих разделах книги, ограничимся здесь упоминанием лишь о тех ее компонентах, которые непосредственно включены в структуру нашего автомата. Прежде всего, к ним относятся механизмы представления плана в М-сети и механизмы систем, следящих за выполнением плана.

Выходная информация модели планирования фиксируется в М-сети специфичной структурой, схематически изображенной на рис. 90. Группа $i$-моделей ДП состоит из $i$-моделей «обобщенных» действий, характеризующих общее направление движения автомата за определенное время, например, «двигаться вперед» и т. п. Группа $i$-моделей $P$ состоит из $i$-моделей этапов плана. $P_i$ — $i$-модель $n$-го этапа. Результат планирования представляется в виде совокупности связей, каждая из которых направлена от $i$-модели этапа пла-

на к $i$-модели «обобщенного» действия и определяет таким образом содержание этапа. В ходе работы М-автомата, по мере выполнения им намеченного плана, оказывается возбужденной одна (и в каждый момент времени — только одна) $i$-модель этапа. По имеющейся связи возбуждение передается на соответствующую $i$-модель «обобщенного» действия и далее — на $i$-модели действий-шагов, которыми данное «обобщенное» действие может быть реализовано. Таким образом, $i$-модели шагов, удовлетворяющих плану, получают дополнительное возбуждение и вероятность их выполнения повышается. В исходном состоянии возбуждена $i$-модель $P_1$. Одновременно со структурой рис. 90 модель планирования формирует информацию о зонах расположения «ориентиров» каждого этапа, т. е. таких объектов среды, при достижении которых соответствующий этап считается выполненным, а также об ожидаемых возбуждениях $i$-моделей Пр и НПр при выполнении каждого из этапов и примерном числе шагов, необходимых для выполнения этапа. Эта информация используется при работе следящих систем «по результатам» и «по чувствам», контролирующих выполнение плана.

Следящая система «по результатам» обеспечивает выполнение следующих операций: 1) если в ходе перемещений автомата в среде оказывается воспринятым объект, отмеченный как ориентир $i$-го этапа плана, то возбуждение $i$-модели $P_i$ снижается до нуля и возбуждается $i$-модель $P_{i+1}$; 2) если после выполнения автоматом определенного в модели планирования числа шагов ориентир не воспринят, то возбуждение $i$-модели выполняемого этапа плана снижается до нуля, получает дополнительное возбуждение $i$-модель НПр и автомат в течение некоторого времени выполняет шаги без

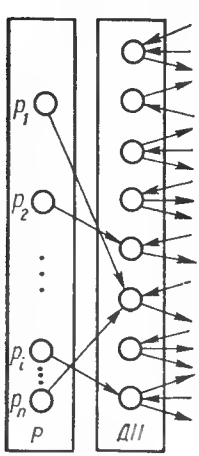



Рис. 90. Задание плана в М-сети.

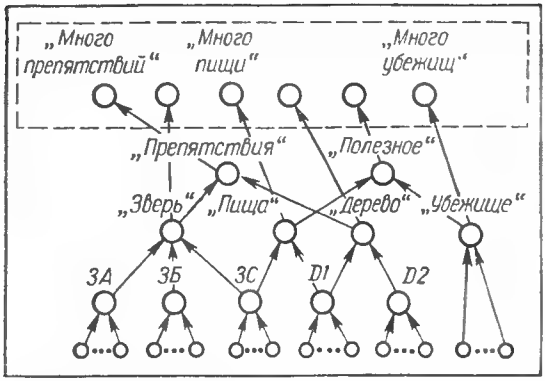



Рис. 91. Схематическое представление структуры блока понятийных обобщений.

учета плана («поиск ориентира»). Если за это время ориентир обнаружен, выполняется операция 1, если нет — автомат формирует требование на построение нового плана (вызов модели планирования).

Следящая система «по чувствам» постоянно производит сравнение текущего значения величины $\Delta^t = П^t_{НПр} - П^t_{Пр}$ с «критическим» значением этой величины, определенным в модели планирования для каждого из этапов плана. Если текущее значение превышает критическое, автомат формирует требование на построение нового плана. Отметим, что новый план будет построен с учетом сложившегося состояния сферы эмоций автомата и может отличаться от предыдущего.

Алгоритмы, реализующие описанные операторы, включены в программу так, как показано на блок-схеме рис. 56.

Дополним теперь приведенное ранее описание блока понятийных обобщений исследуемого М-автомата. При задании начальной структуры этого блока были использованы сведения о характере и числовых параметрах связей, полученные при исследовании модели формирования понятий (§ 5, гл. 9). Данные этого исследования нетрудно обобщить на случаи формирования иерархических понятийных структур и понятий по различным признакам. На рис. 91 приведено схематическое изображение принятой нами структуры «системы знаний» автомата. Кроме «системы знаний», блок понятийных обобщений содержит субблок «мотивации принятия решений», или просто блок «решений». (Это название удобно ввиду его краткости, однако неточно, поскольку *i*-моделями возможных решений автомата являются, вообще говоря, *i*-модели его действий, а мотивация принятия решений, т. е. выбора действий, задается в каждый момент времени структурой и состоянием всей М-сети автомата.) Заданием опре-

деленной структуры блока решений в автомат введена «память» о его гипотетическом прошлом опыте. Схематически фрагмент этой структуры изображен на рис. 92, где знаки → и —( обозначают связи с преимущественно усиливающим и тормозным компонентами соответственно. Схема демонстрирует влияние на выбор решения состояния воспринимающей и эмоциональной сфер. Отметим, что «выбор» (т. е. возбуждение) той или иной $i$-модели решений не означает еще выполнения соответствующих действий, а лишь создает благоприятные условия для их выбора СУТ. Состояние остальной части М-сети может обусловить выполнение других действий. Аналогичные структуры построены для выбора решений «есть» и «нести», «спать» и «создать убежище». При работе автомата в блоке могут устанавливаться новые связи и меняться проходимости заданных — «опыт» может изменяться.

Числовые характеристики блоков М-сети автомата представлены в табл. 15. Формула автомата: $Р^{1}_{82}П^{3}_{44}С^{2}_{200}Э^{1}_{16}Ж^{2}_{6}Д^{2}_{41}2$. На рис. 93 приведена уточненная блок-схема автомата. Обозначения на схеме соответствуют табл. 15 (ПР — блок при-

Рис. 92. Фрагмент структуры блока принятия решений.

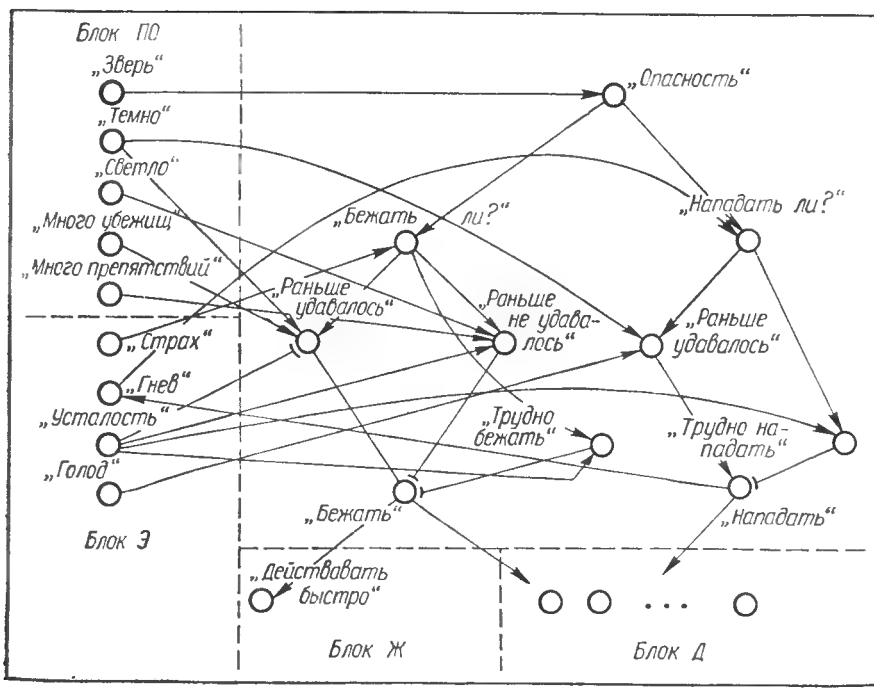


Таблица 15

| Блоки | Обозначение блоков | К-во *i*-моделей | Число уровней | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Приема информации | Р | 82 | 1 | Содержит *i*-модели объектов, запахов, ощущений |
| Понятийных обобщений | ПО | 44 | 3 | Содержит субблок принятия решений, задана начальная организация |
| Памяти ситуаций | ПС | 200 | 2 | |
| Эмоций | Э | 16 | 1 | Задана начальная организация |
| Желаний | Ж | 6 | 2 | Задана начальная организация |
| Действий | Д | 41 | 2 | Содержит *i*-модели действий-шагов, действий «нападать», «активных» действий, этапов плана. Задана начальная организация |

нятия решений). Отдельно показаны различные уровни блоков ПО и ПС. Линии на схеме и штриховка указывают, что между *i*-моделями соединенных блоков и внутри заштрихованных связи задаются на этапе предорганизации. Введена нумерация блоков, которая понадобится в дальнейшем. Места, где связи вводятся на уровне предорганизации, обозначены буквами *а*, *б* и т. д. Связи, помеченные буквой *а*, вводятся на основании данных, полученных в § 5 гл. 8, их

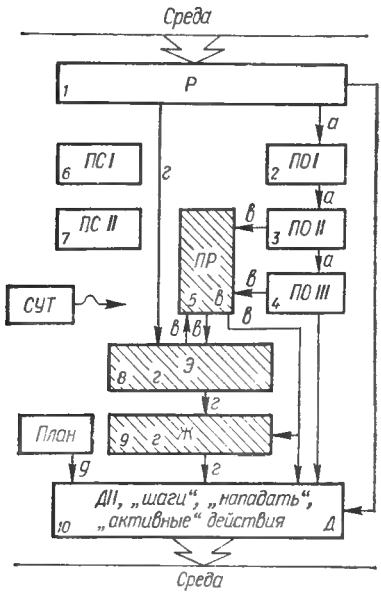



Рис. 93. Уточненная блок-схема М-автомата МОД.

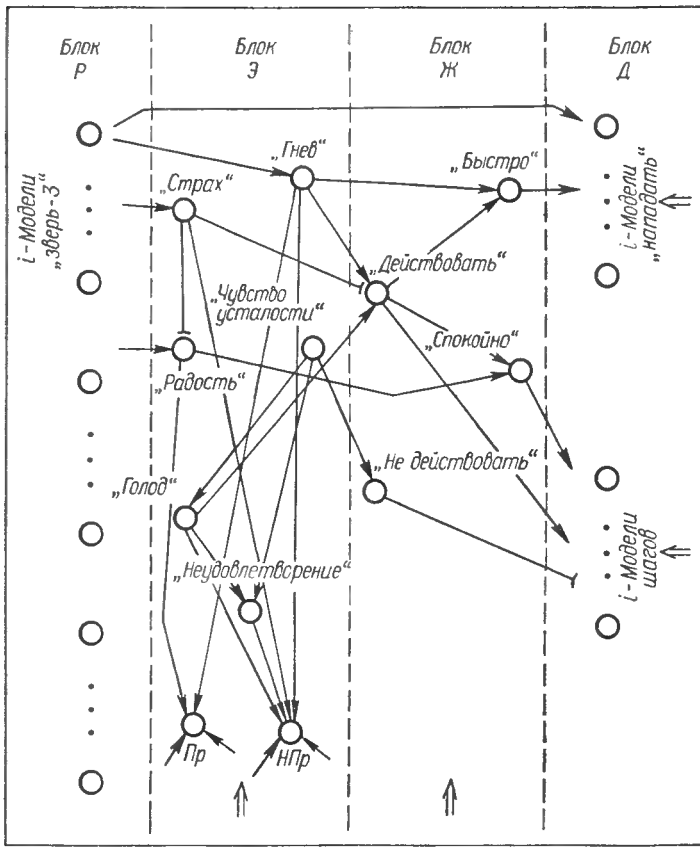



Рис. 94. Фрагмент структуры М-сети. Двойными стрелками показаны связи от других *i*-моделей сети.

схема приведена на рис. 91. Связи, помеченные буквой *б*, вводятся на основании данных § 3 гл. 8. Схема связей, помеченных буквой *в*, проиллюстрирована на рис. 92. Связи, помеченные буквой *г*, задают предорганизацию «эмоционального» канала переработки информации. Представление о структуре этого канала дают рис. 21, 23 в работе [3] и, более конкретно, схема на рис. 94. Связи, помеченные буквой *д*, задают автомату план действий, разный в различных экспериментах; связи *д* вводятся по типу рис. 90.

Из схемы рис. 87 видно, что этап предорганизации занимает важное место в построении модели и что после выполнения этого этапа автомат оказывается способным организовать некоторое поведение. Между блоками Р и Д имеются два пересекающихся канала информации — «логический» (понятийный) и «эмоциональный». Таким образом, восприятие некоторой информации в блоке Р может вызвать выпол-

нение действия. Информация о результатах этого действия воспринимается блоком Р в виде соответствующего изменения среды. Система оказывается замкнутой. Очевидно, характер поведения автомата определяется характером предорганизации. Поскольку предорганизация является существенным этапом работы, во многом предопределяющим ее конечный результат, необходимо провести проверку «качества» принятого варианта. Выполним эту проверку путем исследования поведения предорганизованного автомата в некоторой среде, причем исключим из алгоритма $A$ все операции, связанные с обучением сети. В случае, если поведение автомата окажется удовлетворительным, будем считать удовлетворительным и принятый вариант предорганизации и не будем изменять его при всех дальнейших экспериментах. Такой (необучающийся) вариант М-автомата назовем опорным.

Прежде чем приступить к исследованию предорганизации модели, необходимо определить способы представления и обработки информации о ее функционировании.

## § 2. *Способы представления и обработки результатов*

Пусть предорганизованный М-автомат находится в ситуации, представленной на рис. 95 (напомним, что используются обозначения раздражителей, введенные в табл. 6). Исключим из алгоритма $A$ все операции, связанные с обучением сети. Для этого достаточно придать нулевые значения вводимым параметрам обучения. Тогда характер реакций автомата будет определяться особенностями его предорганизации. Будем различать внешние и внутренние реакции. В рассматриваемом случае внешней реакцией автомата является выполнение им некоторого действия $d_i$ из множества возможных действий $D$. К выбору действия $d_i$ приводит переработка информации, воспринятой автоматом. Внутренние реакции автомата состоят в изменении возбужденностей всех $i$-моделей сети. С этими изменениями связаны также переключения на различные сферы и $i$-модели системы усиления — торможения. Таким образом, внутренние реакции опи-

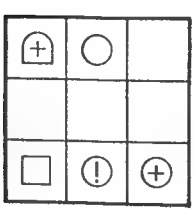


Рис. 95. Тестовая ситуация.

сывают ход процесса переработки информации, приводящего к выбору $d_i$. Рассмотрение внутренних реакций позволит, очевидно, более полно представить работу автомата. Начнем поэтому с анализа именно этих реакций.

Будем рассматривать внутренние реакции автомата в течение некоторого времени с момента выполнения им операций осмотра ситуации. Чтобы исключить на это время выполнение внешних реакций, «затормозим» двигательную сферу сети путем, например, придания малых значений коэффициентам $K_н$ всех $i$-моделей действия. Внутренние реакции автомата на восприятие ситуации рис. 95 в течение 10 моментов дискретного времени представлены на рис. 96—100.

Выше мы зафиксировали некоторую (вообще говоря, произвольную) содержательную интерпретацию рассматриваемой задачи. В рамках этой интерпретации проведена и предорганизация модели. Поэтому содержательное описание внутренних реакций автомата проведем, используя введенную ранее терминологию. При содержательном описании графики на рис. 96—100 отображают «ход мыслей» некоторого условного субъекта, обладающего фиксированным набором «понятий», «чувств», «желаний» и т. п. «Ход мыслей» субъекта вызван восприятием определенных раздражителей из окружающей среды. Результатом «мышления» является принятие решения о выполнении некоторого действия. Интерпретация реакций основана на том, что возбужденность каждой $i$-модели сопоставляется с напряженностью (выраженностью, субъективной важностью) «мыслей» субъекта о соответствующем объекте или состоянии. Наиболее важные «мысли» (наиболее возбужденные $i$-модели) «осознаются» субъектом (выбираются СУТ). Менее важные составляют «подсознание».

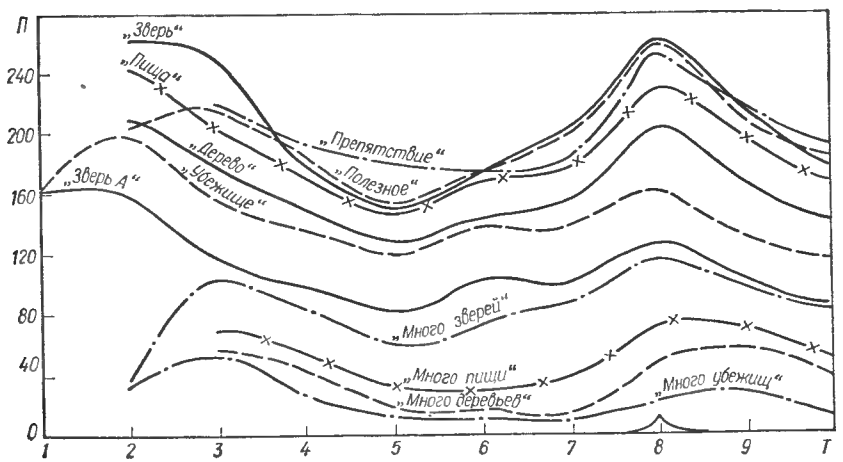
Ситуация, в которой находится автомат, содержит всего пять раздражителей, из которых три относятся к классу «зверь», четыре — «препятствие», два — «пища» и один — «убежище». Два раздражителя («зверь А» и «зверь В») абсолютно неприятны, два имеют смешанный характер и один абсолютно приятен. Ситуация, таким образом, весьма неоднородна и может вызвать противоречивые «стремления» и «мысли».

На рис. 96 представлены кривые возбуждения $i$-моделей блока понятийных обобщений. Вид этих кривых допускает следующую содержательную интерпретацию. В первый после осмотра момент возбуждены «мысли» о раздражителях, имеющихся в среде. Степень их возбужденности одинакова — выполняется фиксация ситуации. В следующий момент происходит «узнавание» раздражителей и возбуждаются $i$-модели понятий первого уровня (см. рис. 91) — возникают «мысли»: «зверь», «пища», «дерево», «убежище». Их степень воз-

бужденности уже неодинакова — наиболее выраженной оказывается «мысль» о «звере», менее выраженной — о «пище» и т. д. Это обусловлено различным представлением соответствующих раздражителей в ситуации. В дальнейшем (начиная с $t_3$) здесь будет сказываться влияние эмоциональных оценок, вырабатываемых в блоке Э. Процесс «узнавания» раздражителей продолжается, и в момент $t_3$ возбуждаются понятия высшего уровня — «препятствие» и «полезное». Начиная с этого момента «мысли» о «звере», «пище», «препятствии» и «полезном» остаются ведущими, причем работа СУТпо и изменения эмоциональных состояний приводит к временному доминированию то одной, то другой из них. Остальные же «мысли» играют меньшую роль, т. е. оказывают меньшее влияние на выбор действия. Начиная с момента $t_2$ формируются представления о количественной нагруженности среды раздражителями: возбуждаются $i$-модели «много зверей», «много пищи» и т. п. Видно, что степень их возбужденности адекватна ситуации. Хорошо выражена ритмика возбуждения всех $i$-моделей, что обеспечивается функционированием алгоритмов СУТ-2 и СУТпо. Из рисунка видно, что основную роль в переработке информации играют понятия высших уровней.

На рис. 97 представлены кривые возбуждения $i$-моделей блока эмоций. В момент $t_1$ эмоциональная оценка еще не выработана и $i$-модели блока не возбуждены. Наиболее возбужденными в следующий момент оказываются «страх» и «гнев». Их возбуждение обусловлено «безусловной реакцией» автомата на восприятие раздражителей класса «зверь».

Рис. 96. Внутренние реакции МОД в тестовой ситуации. Блок понятийных обобщений.



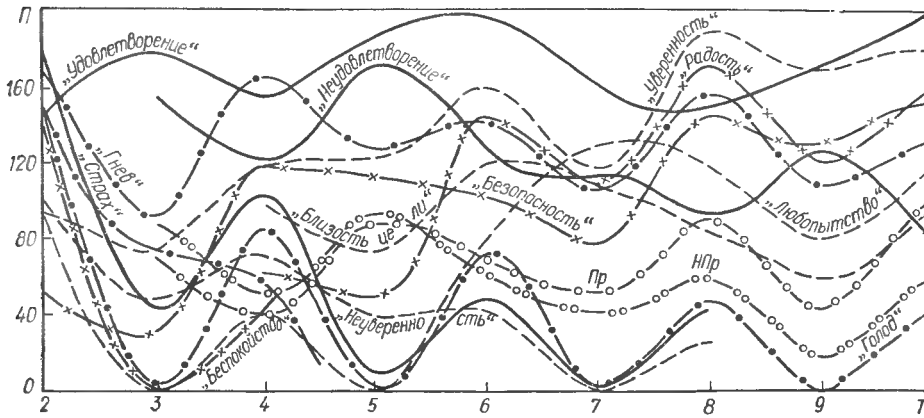



Рис. 97. Внутренние реакции МОД в тестовой ситуации. Блок эмоций.

Этим «чувствам» соответствуют два основных вида реакций автомата на опасность — пассивно оборонительная («страх» включает «программу побега») и активно оборонительная («гнев» включает «программу нападения»). При этом «страх» вызывается прежде всего восприятием раздражителей «зверь А» и «зверь В», по условию наиболее опасных для модели, а «гнев» — восприятием съедобного «зверя С», на которого нужно «напасть», чтобы его можно было «съесть». В ходе переработки информации выработанные оценки меняются: «страх» постепенно исчезает (поскольку наличие в среде «убежища» вызывает «чувства» «уверенности» и «безопасности»), а «гнев» становится менее интенсивным, уходит в «подсознание», хотя и поддерживается на сравнительно высоком уровне, поскольку его возбуждение необходимо для овладения съедобным «зверем». Таким образом, действие «нападать» является одним из возможных решений автомата, поддерживаемым «пищевым рефлексом». Связь «гнева» с этим рефлексом позволяет ожидать, что «гнев» будет возбужден тем сильнее, чем больше будет напряжен «пищевой рефлекс». Напряженность последнего отображается в сети возбуждением $i$-модели «чувство голода». Таким образом, возбуждения «голода» и «гнева» должны коррелировать друг с другом. Такая (положительная) корреляция и наблюдается в эксперименте. Характерно, что $i$-модели «гнев» и «чувство голода» непосредственно друг с другом не связаны. Это дает основания полагать, что совокупность связей между $i$-моделями чувств удовлетворительно отражает работу механизмов пищевого рефлекса.

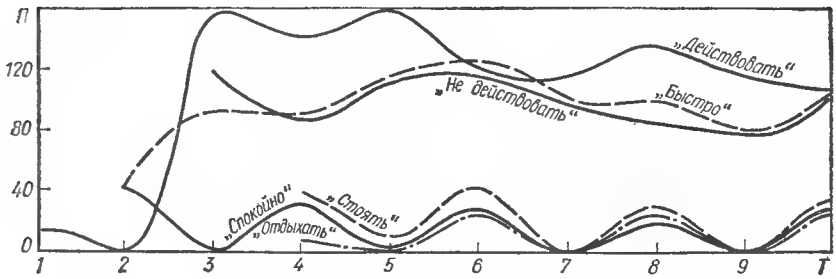



Рис. 98. Внутренние реакции МОД в тестовой ситуации. Блок желаний.

Изложенные рассуждения приведены в качестве примера, иллюстрирующего возможность и способы содержательной интерпретации числовых результатов просчета модели. Кривые рис. 97—100 могут служить основанием для целого ряда такого рода рассуждений, которые мы приводить здесь не будем. Отметим лишь несколько интересных моментов. Как указывалось ранее, возбуждение $i$-модели «голод» дискретно увеличивается в каждый момент времени (от «тела») и в данном эксперименте в момент времени $t_{10}$ составило 40 *усл. ед.* $i$-Модель «чувства голода» в блоке Э связана как с $i$-моделью «голод», так и с $i$-моделями других чувств. Представленные на рисунках возбуждения «чувства голода» соответствуют, таким образом, «субъективному» восприятию модели и возникают «рефлекторно» при восприятии раздражителей класса «пища». $i$-Модель чувства «близость цели» также возбуждается дискретно и пропорционально расстоянию от собственной ячейки до ближайшего ориентира. Она также «субъективно» переживается автоматом в зависимости от его состояния.

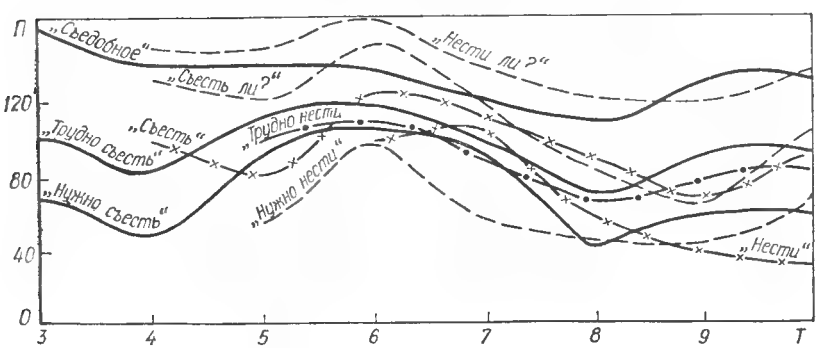
Рассмотрение графиков показывает, что при переработке информации автомат меняет характер оценки воспринятой ситуации. Действительно, примерно до момента $t_5$ ведущую роль играют возбуждения «негативно окрашенных» чувств, затем они существенно затухают и преимущество получают «положительные» чувства. Соответственно изменяются и возбуждения интегрирующих центров Пр и НПр. Переоценка осуществляется в период $t_5 - t_6$ и является устойчивой, поскольку разность $П_{пр} - П_{Нпр}$ монотонно возрастает во времени. Такая «установка» модели на первоочередное выделение негативных свойств ситуации отображает доминирующее влияние «оборонительного рефлекса», представленного, как и «пищевой рефлекс», совокупностью связей в М-сети. Как и следовало ожидать, неоднородность раздражителей воспринятой ситуации привела к одновременному

возбуждению *i*-моделей противоположных по характеру чувств («удовлетворение» и «неудовлетворение», «уверенность» и «неуверенность» и т. п.).

Динамика возбуждения *i*-моделей желаний иллюстрируется графиками на рис. 98. Основную роль играет здесь желание «действовать». При этом высокая активность «чувства гнева» и «уверенности» диктует характеристику действий — «быстро». Возбуждение желания «не действовать» также велико, что является следствием одновременного возбуждения противоположных чувств в блоке Э. Характерно, что момент «наибольшей неуверенности», обусловленный практическим совпадением возбужденностей противоположных желаний, совпадает с моментом переоценки ситуации в блоке Э.

С целью иллюстрации работы блока принятия решений на рис. 99 приведены графики возбуждений *i*-моделей, реализующих программу оценки решений «есть» и «нести». Названия этих моделей приведены на рисунке, их организация аналогична структуре на рис. 92. Блок оценивает в условных величинах (отображаемых возбужденностями) «нужность» и «трудность» выполнения действий «есть» и «нести». В нашем случае оценка относится к раздражителю «зверь С», поскольку понятие «зверь» возбуждено сильнее, чем понятие «дерево», и, кроме того, «зверь» является более предпочтительной «пищей» (см. табл. 4). Конкретные значения оценок определяются структурой ситуации (съесть трудно, так как пищей является зверь, не очень нужно, так как есть и другая пища и голод не велик; нести трудно, так как имеются препятствия и т. п.). Преимущество получает решение «съесть», однако его возбуждение не очень велико. Возбуждение *i*-моделей решений увеличивает возбуждение соответ-

Рис. 99. Внутренние реакции МОД в тестовой ситуации. Блок решений.



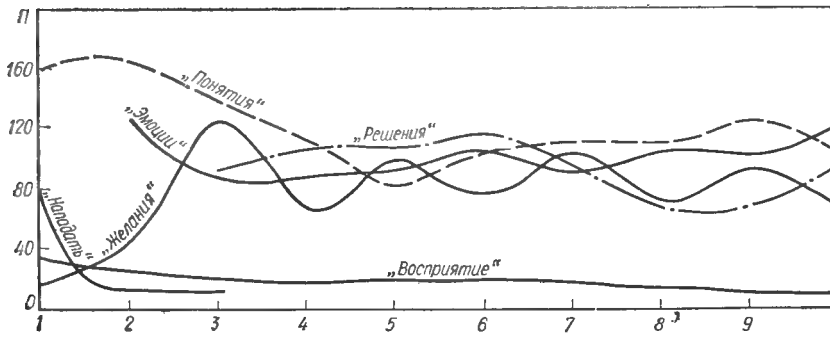



Рис. 100. Динамика среднего возбуждения различных блоков.

ствующих действий, что оказывает влияние на их выбор СУТ в дальнейшем.

В той же форме, что и на рис. 97—99, может быть представлена динамика возбуждений *i*-моделей блоков Р и Д. В приведенных графиках содержится информация о работе СУТ первого уровня. В каждом блоке Х и в каждый момент времени $СУТ_X$ выделяет наиболее возбужденную *i*-модель. Последовательность названий *i*-моделей, выделяемых СУТ в различные моменты времени, представляет собой запись «хода рассуждений» автомата. Более грубо «ход рассуждений» представляется СУТ-2. Последняя использует в своей работе информацию о динамике возбуждения не отдельных *i*-моделей, а определенных участков блоков М-сети. На рис. 100 представлены графики среднего возбуждения различных блоков (рассчитанного для каждого момента времени как среднее арифметическое по возбужденным *i*-моделям блока). Из рисунка видно, что ведущую роль в процессе переработки информации играет блок понятийных обобщений. Несколько меньшая роль принадлежит блокам эмоций и желаний. Роль блока решений меняется во времени. В разные моменты СУТ-2 выделяет блоки ПО, Р и Э.

Приведенные графики достаточно полно отображают процессы в М-сети, однако являются весьма громоздкими. Поэтому в дальнейшем результаты экспериментов с автоматом (реакции автомата) будем представлять в форме таблиц, содержащих названия *i*-моделей блоков, выделяемых СУТ в разные моменты времени. Такие СУТ-таблицы на содержательном уровне изображают «ход рассуждений» модели в эксперименте (табл. 16). Верхняя часть таблицы используется для изображения ситуации, в которой находится автомат, его внешних реакций и для различных замечаний. В строке «СУТ-2» помещаются названия блоков, выделенных

Таблица 16

Сфера действий приторможена

| Блоки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| СУТ-2 | «Понятия» | «Понятия» | «Понятия» | «Понятия» | «Решения» |
| Р | «Запах 2» | «Запах 2» | «Запах 2» | «Запах 1» | «Запах 2» |
| ПО | «Убежище» | «Зверь» | «Зверь» | «Препятствие» | «Препятствие» |
| Э | — | «Страх» | «Удовлетворение» | «Гнев» | «Удовлетворение» |
| Ж | «Действовать» | «Быстро» | «Действовать» | «Действовать» | «Действовать» |
| ПР | — | — | «Опасность» | «Опасность» | «Нападать ли?» |
| ДП | ↗ | ↗ | ↗ | — | — |
| Ш | — | ↗ | ↙ | ↗ | ↗ |
| НП | ↘ | ↘ | ↘ | ↙ | ↙ |

| Блоки | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|
| СУТ-2 | «Решения» | «Понятия» | «Понятия» | «Понятия» | «Эмоции» |
| Р | «Запах 2» | «Запах 2» | «Запах 2» | «Запах 1» | «Запах 2» |
| ПО | «Зверь» | «Зверь» | «Зверь» | «Зверь» | «Препятствие» |
| Э | «Удовлетворение» | «Уверенность» | «Уверенность» | «Удовлетворение» | «Удовлетворение» |
| Ж | «Быстро» | «Действовать» | «Действовать» | «Действовать» | «Быстро» |
| ПР | «Нападать ли?» | «Нести ли?» | «Нести ли?» | «Опасность» | «Опасность» |
| ДП | ↗ | ↗ | — | ↗ | ↗ |
| Ш | ↙ | ↙ | ↗ | ↙ | ↙ |
| НП | — | — | ↙ | — | — |

СУТ-2 в различные моменты времени. Первый столбец таблицы содержит наименования блоков М-сети. В строках «ДП», «Ш» и «НП» стрелки изображают соответственно действия второго уровня, действия-шаги и действия «нападать», *i*-модели которых выделяются системами усиления — тормо-

жения соответствующих блоков. Прочерк означает, что в данный момент $i$-модели соответствующего блока не возбуждаются.

Рассмотрим СУТ-таблицу описанного эксперимента. Содержание строк СУТ-2, ПО, Э, Ж следует из графиков рис. 97—100. Чтобы упростить процессы в М-сети, на работу автомата было наложено следующее ограничение: СУТр может выделять любые $i$-модели блока Р, за исключением $i$-моделей раздражителей-объектов (о составе блока Р см. гл. 8). Поэтому строка Р таблицы содержит только названия раздражителей-запахов. Содержание строки ПР обусловлено тем, что в ходе эксперимента одновременно работали все три программы блока принятия решений. Видно, что наиболее активными были программы, запускаемые понятиями «опасность» и «съедобное», так как именно их $i$-модели выбирались СУТпр. Строка ДП указывает направление движения, заданное автомату планом. На интересное обстоятельство указывает содержание строки «Ш». В момент $t_2$ автомат готов выполнить шаг, соответствующий плану. Однако в дальнейшем, после некоторого «обдумывания», он «меняет решение» и отдает преимущество шагу, ведущему к весьма сильному, абсолютно положительному раздражителю «убежище». Из таблицы видно, что в период $t_1 - t_3$ (как показано выше, это период максимально негативной оценки ситуации) автомат готов «принять решение» о нападении на «зверя $C$». Последующая переоценка ситуации приводит к отказу от рассмотрения этого решения.

Описанный эксперимент проведен при заторможенном блоке Д сети. Поэтому за рассчитанный промежуток времени автомат не выполнял действий. Предположим, что сфера Д расторможена. Тогда, если СУТ-2 выделит блок «шаги» в момент $t_2$, автомат выполнит действие-шаг, соответствующее плану. Если это выделение произойдет позже, автомат переместится в «убежище». Если же СУТ-2 выделит блок «нападать» до момента $t_3$, будет выполнено нападение. Все эти варианты поведения легко реализовать путем задания соответствующих значений коэффициента $K_н$ $i$-модели блока Д. Этим способом мы можем, следовательно, сделать автомат «импульсивным», «агрессивным» и т. п. Рассмотренная возможность является лишь одной из множества возможностей такого рода, связанных с изменением и подбором коэффициентов, задающих систему (9.33).

С помощью СУТ-таблиц нам предстоит описывать результаты весьма продолжительных экспериментов. Не вся информация в таблице является одинаково важной. Так, содержание строки Р нетрудно предвидеть, зная содержание ситуаций. Не всегда нужно знать также, какие процессы проходят

в блоке Д, так как обязательно будет известен окончательный выбор решения — внешняя реакция автомата. С другой стороны, для оценки работы модели всегда представляют интерес процессы, развивающиеся в «логическом» и «эмоциональном» каналах переработки информации. Поэтому в ряде случаев мы будем пользоваться сокращенной формой СУТ-таблиц, включающей лишь строки СУТ-2, ПО, Э и Ж.

Из изложенного ясно, что результаты просчетов моделей, выполненных в виде М-автоматов, допускают содержательные интерпретации. Последние, однако, имеют лишь относительную ценность, поскольку в значительной мере опираются на интуитивные представления разработчика. Кроме того, содержательные интерпретации имеют смысл в случаях, когда изучаемые автоматы построены как модели психических функций или рассматриваются как таковые. При этом существует соответствие между содержательными уровнями постановки задачи и описания результатов. В тех случаях, когда задача моделирования ставится достаточно определенно, представляется необходимым ввести строгие числовые критерии оценки результата. Содержательные описания играют здесь вспомогательную роль. Воспользуемся постановкой задачи, приведенной в гл. 9 для введения критериев оценки реакций исследуемой модели двигательного поведения.

В общей форме показатель качества функционирования абстрактной системы М записан в виде функционала (9.36). Учитывая это, введем критерий качества функционирования модели двигательного поведения. Показано, что функцию оценки в М-автомате реализует блок Э, содержащий $i$-модели интегрирующих центров Пр и НПр. Пусть М-автомат $A$ в течение $N$ моментов дискретного времени функционирует в некоторой среде $S$. В каждый момент времени блок Э будет вырабатывать некоторую оценку состояния автомата. Соответственно будут изменяться возбужденности $i$-моделей Пр и НПр. Критерий качества функционирования $e$ введем как среднюю оценку за время функционирования $A$ в среде:

$$e = \frac{1}{N} \sum_i (\Pi_{\text{Пр}}^{t_i} - \Pi_{\text{НПр}}^{t_i}), \qquad i = 1, 2, \ldots, N. \tag{10.1}$$

Укажем на двойственную роль оценки $e$. Один и тот же автомат в различных средах будет формировать различные значения $e$, которые можно в этом случае рассматривать как оценки сред, но оценки, даваемые определенным, именно данным автоматом (субъективные оценки). С другой стороны, в одной и той же среде различные варианты автоматов также будут формировать различные значения $e$, рассмат-

Таблица 17

| Объекты | Понятия | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | «Зверь *A*» | «Зверь *B*» | «Зверь *C*» | «Зверь» | «Дерево *A*» | «Дерево *B*» | «Дерево» | «Пища» | «Убежище» | «Препятствие» | «Полезное» |
| «Зверь А» | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| «Зверь В» | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| «Зверь С» | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| «Дерево А» | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| «Дерево В» | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| «Убежище» | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

риваемые в данном случае как показатели приспособленности автоматов к среде, показатели их адаптационных возможностей, оценки качества их функционирования. Но все это — относительно лишь данной конкретной среды. Ниже мы будем использовать оценку $e$ в обоих смыслах, специально оговаривая это в соответствующих случаях.

Постановка задачи требует оценки «хода рассуждений» или «хода мышления» модели. Из предыдущего изложения ясно, что речь идет об оценке внутренних реакций автомата. Понятие рациональности мышления не является строго определенным. Уточним наше требование следующим образом. Потребуем определенного соответствия между процессами, протекающими в «логическом» канале переработки информации, и содержанием ситуаций внешней среды, в которых находится автомат. Иначе говоря, мы требуем адекватности «логических представлений» автомата о среде самой этой среде. Такое требование представляется естественным, поскольку правильное узнавание объектов среды, т. е. возбуждение $i$-моделей соответствующих понятий, играет важную роль при выборе соответствующих данной ситуации действий. Будем оценивать упомянутое соответствие на уровне выборов СУТпо. Зафиксируем таблицу соответствий $T^{л}$ (табл. 17). Строки этой таблицы соответствуют раздражителям, которые может «воспринять» автомат из среды, а столбцы — названиям $i$-моделей понятий, которые может выделить СУТпо в блоке ПО. Единица на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца ($T^{л}_{ij} = 1$) означает, что если в некоторый момент времени ситуация, в которой находится автомат, содержит раздражитель $i$ и в тот же момент времени СУТпо выделяет $i$-модель понятия $j$, то такая внутренняя реакция может считаться адекватной. Если $T^{л}_{ij} = 0$, то реакция неадекватна.

Таким образом, имея СУТ-таблицу некоторого эксперимента, можно оценить адекватность работы СУТ блока понятийных обобщений в каждый момент времени и вычислить индекс адекватности $I_л$:

$$I_л = \frac{1}{N}\sum_i \delta_{t_i}, \qquad i = 1, 2, \ldots, N, \tag{10.2}$$

где $\delta_{t_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } T^л_{ij} = 1; \\ 0, & \text{если } T^л_{ij} = 0. \end{cases}$

Из интуитивных соображений мы не требуем непосредственного соответствия между внешней средой и процессами в «эмоциональном канале» переработки информации: далеко не всегда настроение человека соответствует тому, что он наблюдает в данный момент. Зато соответствие между эмоциональной и понятийной сферами мышления представляется нам более очевидным. По аналогии потребуем определенного соответствия между процессами, протекающими в «логическом» и «эмоциональном» каналах переработки информации М-автомата. Будем оценивать это соответствие на уровне работы СУТпо и СУТэ. Зафиксируем таблицу соответствий $T^э$ (табл. 18). Строки этой таблицы соответствуют названиям $i$-моделей понятий, которые могут быть выбраны СУТпо, столбцы — названиям $i$-моделей эмоций, выбираемых СУТэ. Если $T^э_{ij} = 1$, то реакция автомата считается в данный момент адекватной, если же $T^э_{ij} = 0$ — неадекватной. Анализируя СУТ-таблицу некоторого эксперимента, можно

Таблица 18

| Понятия | «Эмоции» | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | НПр | «Страх» | «Гнев» | «Неудовлетворение» | «Ч. голода» | «Ч. усталости» | «Ч. неуверенности» | «Недовольство» | «Беспокойство» | «Любопытство» | «Ч. близости цели» | «Ч. безопасности» | «Уверенность» | «Удовлетворение» | «Радость» | Пр |
| «Зверь А» | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| «Зверь В» | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| «Зверь С» | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| «Зверь» | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| «Дерево А» | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| «Дерево В» | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| «Дерево» | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| «Убежище» | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| «Пища» | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| «Препятствие» | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| «Полезное» | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

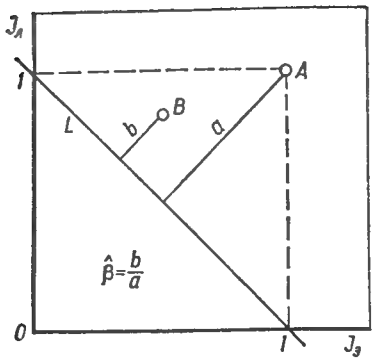



Рис. 101. К определению коэффициента адекватности внутренних реакций М-автомата.

оценить адекватность реакций в каждый момент и вычислить индекс адекватности $I_э$:

$$I_э = \frac{1}{N}\sum_i \xi_{t_i}, \qquad i = 1, 2, \ldots, N, \tag{10.3}$$

где $\xi_{t_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } T^э_{ij} = 1; \\ 0, & \text{если } T^э_{ij} = 0. \end{cases}$

Отметим, что выражения (10.2) и (10.3) дают «слабые» оценки адекватности в том смысле, что они не учитывают возможности отсроченного возбуждения $i$-моделей («вспоминания» состояний), которые зачастую представляются адекватными при содержательном описании. Очевидно, выполняются соотношения

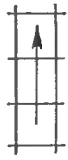
$$0 \leqslant I_л \leqslant 1, \quad 0 \leqslant I_э \leqslant 1. \tag{10.4}$$

Рассмотрим фазовое пространство этих индексов (рис. 101). Точка (1,1) в этом пространстве соответствует реакциям, оцениваемым как максимально адекватные или рациональные. Точка (0,0) представляет максимально нерациональные реакции. Введем границу $L$, построение которой ясно из рисунка, и будем считать рациональными все те реакции, представляющие точки которых расположены выше границы $L$. Ориентированное расстояние от представляющей точки $B$ до $L$ будем рассматривать как меру рациональности реакций, соответствующих точке $B$. Оценим рациональность реакций $B$ коэффициентом $\hat{\beta}$, вычисляемым как отношение меры рациональности $B$ к максимально возможному значению этой меры. Из геометрических построений рис. 101 следует, что для реакций, описываемых определенными значениями индексов $I_л$ и $I_э$, коэффициент $\hat{\beta}$ вычисляется следующим образом:

$$\hat{\beta} = I_л + I_э - 1. \tag{10.5}$$

Рациональными считаются реакции, для которых $0 < \hat{\beta} \leqslant 1$.

Таблица 19

| Действие | Шаг | Шаг «быстро» | «Нападение» | «Съесть объект» | «Нести объект» | «Бросить объект» | «Создать убежище» | «Спать» |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | |  | | | | | | |
| Результат | Перемещение в среде | | | Объект удаляется из ячейки | | Объект появляется в ячейке | | — |

Из изложенного ясно, что параметр $\hat{\beta}$ не является исчерпывающим при описании адекватности внутренних реакций автомата в общем случае. Он введен на основе интуитивных рассуждений (задания таблиц $T^{л}$ и $T^{э}$) и использует не всю имеющуюся информацию о работе модели. С другой стороны, он, хотя и грубо, соответствует некоторым содержательным

Таблица 20

| Название $t$-модели | Условное обозначение | Название $t$-модели | Условное обозначение |
|---|---|---|---|
| Эмоции и чувства | | убежище | уб |
| недовольство | нв | препятствие | пп |
| гнев | гн | полезное | пл |
| беспокойство | бп | Желания | |
| страх | сх | действовать | дт |
| удовлетворение | уд | не действовать | нд |
| неудовлетворение | нт | быстро | бс |
| любопытство | лб | спокойно | сп |
| ч. близости цели | бц | стоять | ст |
| ч. усталости | ус | отдыхать | от |
| ч. голода | гл | Блоки | |
| ч. безопасности | бп | рецепторный | РЦ |
| ч. уверенности | ув | эмоций | Э |
| ч. неуверенности | ну | желаний | Ж |
| ч. радости | рд | памяти ситуаций | ПС |
| Понятия | | понятийных обобщений | ПО |
| зверь А | зА | принятия решений | Р |
| зверь В | зВ | действий II уровня | ДII |
| зверь С | зС | активных действий | АД |
| дерево А | дА | нападать | НП |
| дерево В | дВ | шаги | Ш |
| зверь | зв | | |
| пища | пщ | | |
| дерево | др | | |

представлениям о характере реакций и легко вычисляется. Поэтому, а также в связи с отсутствием других разработанных оценок такого рода мы будем использовать $\hat{\beta}$ в качестве одного из параметров, характеризующих работу автомата.

При функционировании в среде автомат выполняет некоторую последовательность действий-шагов, переводящих его из исходной ячейки $g_н$ в финальную $g_ф$. Последовательность таких шагов составляет траекторию движения автомата. Введем вспомогательный коэффициент $\hat{\gamma}$ для оценки качества траектории. Будем считать траекторию тем лучше, чем она короче, т. е. чем из меньшего числа шагов она состоит. Пусть в каком-либо эксперименте автомат переместился из $g_н$ в $g_ф$ за $K$ шагов. Минимально возможной длиной траектории будем считать такое количество шагов $K_0$, которое выполнил бы, переходя из $g_н$ в $g_ф$ тот же автомат при условии, что среда не содержит никаких раздражителей. В этом случае автомат двигался бы под влиянием только заданного плана и достиг цели за минимальное число шагов. Таким образом,

$$\hat{\gamma} = \frac{K_0}{K}(g_н,\ g_ф - \text{const}); \tag{10.6}$$

чем ближе значение $\hat{\gamma}$ к 1, тем лучше оцениваемая траектория. В качестве ячеек $g_н$ и $g_ф$ будем в различных случаях принимать различные ячейки конкретных сред, специально оговаривая это. Условные обозначения внешних реакций автомата приведены в табл. 19. Сокращения, используемые в дальнейшем для обозначения названий $i$-моделей в СУТ-таблицах, приведены в табл. 20.

## § 3. *Исследование предорганизации модели*

Вводя связи между различными $i$-моделями в ходе предорганизации М-сети, мы исходили в значительной степени из содержательных рассуждений. Задавая некоторую связь $R_{ij}$, мы фиксировали этим способом «элементарное» суждение о возможной взаимосвязи понятий $i$ и $j$ в понятийной системе моделируемого (условного) субъекта. Функционирование заданной таким образом структуры является своего рода автоматическим выведением следствий из множества сделанных «элементарных» суждений. Задача проверки качества принятого варианта предорганизации была поставлена в § 1. Осуществим эту проверку, наблюдая за реакциями опорного варианта модели в ряде специально подобранных тестовых ситуаций.

Тестовые ситуации (рис. 102) выбраны таким образом, что представляют основные типы ситуаций, встречающихся

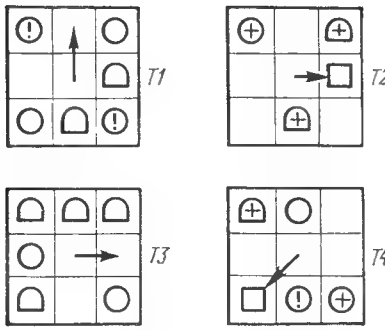
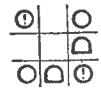



Рис. 102. Тестовые ситуации.

в дальнейших исследованиях. Так, ситуация Т1 содержит только отрицательные раздражители: всех представителей класса «зверь» и «несъедобное дерево В». Ситуация Т2 положительна, так как содержит «съедобные» объекты и «убежище». Ситуация Т3 отрицательна, но менее, чем Т1. Промежуточное положение занимает и Т4, содржащая как «съедобные», так и «опасные» объекты.

Реакции автомата в ситуации Т4 представлены на рис. 95—99 (их содержательное описание см. в § 2), в остальных ситуациях — СУТ-таблицами (табл. 21). Содержательные интерпретации реакций здесь и в дальнейшем не приводятся. Значения оценочных коэффициентов для всех случаев тестовых ситуаций приведены в табл. 22. Видно, что наиболее отрицательная оценка $e$ выработана автоматом для ситуации Т1, наиболее положительная — для Т2. Оценки Т3 и Т4 занимают промежуточное положение. В целом это правильно отражает характер ситуаций. Близость оценок Т1 и Т3 указывает на то, что раздражитель «дерево В» оценивается автоматом примерно так же, как и раздражитель класса «зверь». Но это касается только общей, интегральной оценки: конкретные «чувства», вызываемые этими раздражителями, различны. Значения индексов адекватности реакций $\beta$ во всех случаях принадлежат допустимой области. Видно, что «логический» канал обеспечивает адекватную переработку информации ($I_л = 1$). Степень соответствия между «логикой» и «эмоциями» изменяется в зависимости от типа ситуации. Характерно, что значения $I_э$ максимальны для отрицательно оцениваемых ситуаций. Это, однако, справедливо лишь для уровня «внимания»: в «подсознательной» сфере формируются адекватные оценки, о чем косвенно свидетельствует удовлетворительное соотношение вырабатываемых значений $e$. В ситуации Т4, содержащей раздражители, имеющие противоположные значения для автомата, значение $e$ близко к нейтральному (нулю). Здесь же, в условиях «ошибки мотивов», минимальным оказывается $I_э$. Указанные

Таблица 21

| Тестовая ситуация Т1 |  ДП : | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| СУТ-2 | ПО | ПО | ПО | Э | Э | ПО | Э | Э | Э | Э |
| ПО | зА | зв | зв | пп | пп | пп | зв | зв | пп | пп |
| Э | | сх | нт | нт | нт | сх | нт | нт | нт | ну |
| Ж | дт | бс | дт | дт | дт | дт | нд | нд | нд | нд |

| Тестовая ситуация Т2 | ДП : | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| СУТ-2 | ПО | ПО | ПО | ПО | Э | Э | ПО | Э | Э | Э |
| ПО | дА | пщ | пщ | пл | пл | пп | пп | пл | пл | пп |
| Э | | нв | уд | уд | уд | уд | ув | рд | уд | уд |
| Ж | бс | дт | дт | дт | дт | нд | дт | дт | дт | дт |

| Тестовая ситуация Т3 | ДП : | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| СУТ-2 | ПО | ПО | ПО | Э | Э | ПО | ПО | ПО | Э | Э |
| ПО | дВ | дВ | пп | пп | пп | др | пп | пп | пп | пп |
| Э | | сх | нт | нт | нт | нт | нв | нт | нт | нт |
| Ж | дт | бс | дт | дт | дт | дт | нд | нд | дт | дт |

выше особенности соответствуют интуитивным представлениям об удовлетворительном поведении; с формальной стороны реакции оцениваются как адекватные.

Описанные тесты проводились с автоматом, блок действия которого был заторможен. При его растормаживании автомат выполнил в тестовых ситуациях шаги, указанные на рис. 102 стрелками. Шаги выполнялись в моменты $t_5$ — $t_6$. План, заданный автомату, требовал его передвижения

Таблица 22

| Ситуации | Коэффициенты | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $e$ | $I_л$ | $I_э$ | $\hat{\beta}$ |
| Т1 | —70,8 | 1 | 1 | 1 |
| Т2 | 26,4 | 1 | 0,57 | 0,57 |
| Т3 | —67,1 | 1 | 0,89 | 0,89 |
| Т4 | 8,2 | 1 | 0,24 | 0,24 |

в направлении, указанном стрелкой для ДП в СУТ-таблицах. Видно, что в ситуациях Т1 и Т3 автомат выполняет шаги, соответствующие плану и обеспечивающие обход препятствий. В ситуациях Т2 и Т4 он переходит в ячейки, содержащие «абсолютно положительный» раздражитель. Увеличивая возбуждение $i$-модели первого этапа плана (т. е. силу цели), удается заставить автомат выполнить нужный шаг и в этих ситуациях.

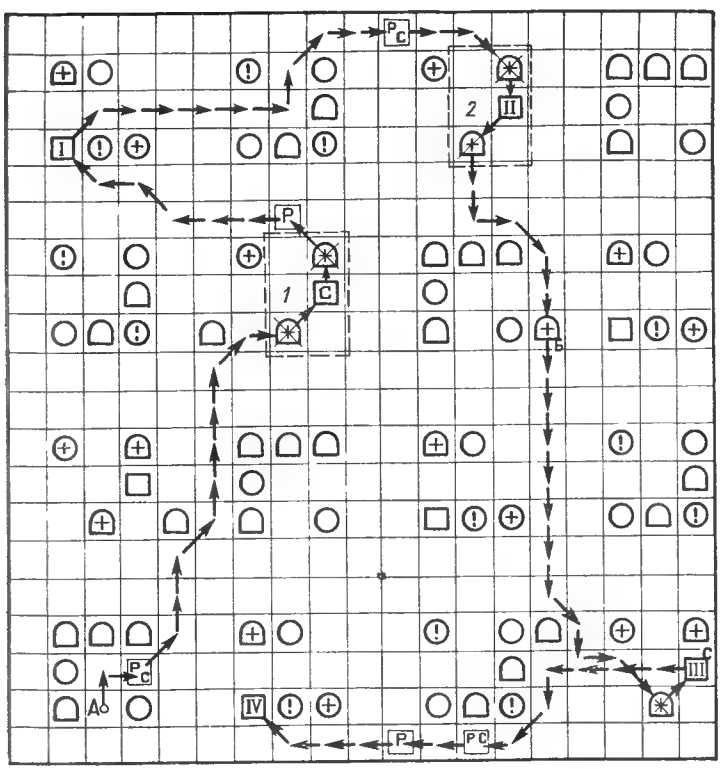



Рис. 103 Внешние реакции необучающегося варианта М-автомата.

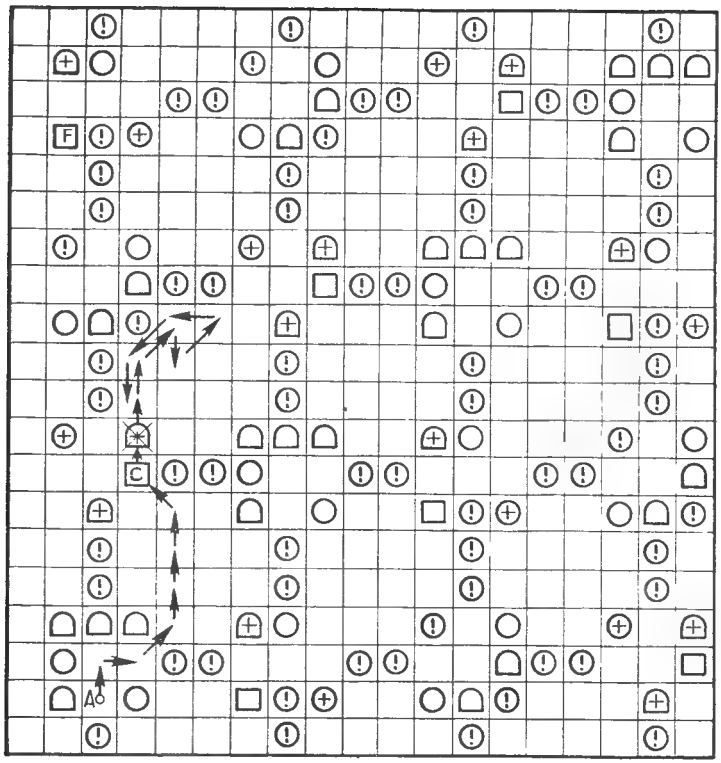
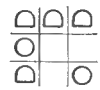



Рис. 104. Внешние реакции $A_0$ в среде $S_1$.

Для проверки взаимодействия всех механизмов модели (плана, выбора активных действий, эффекторных алгоритмов и др.) было рассмотрено поведение автомата в условной среде. Эта среда изображена на рис. 103 и состоит из регулярно расположенных тестовых ситуаций Т1 — Т4. Автомат стартовал из ячейки *А*. Ориентиры последовательных этапов плана отмечены римскими цифрами. Видно, что все этапы плана выполнены полностью. Выполнялись также все активные действия.

Характерны реакции автомата в области 1. Автомат «съедает пищу», переходит в «убежище», где «спит». Во время «сна» возрастает «голод» и, после выполнения следующего шага, автомат опять «ест». Аналогичные ситуации существуют в области 2. Здесь автомат также «ест» и затем переходит в «убежище». В этом случае, однако, он не «спит» (так как недавно выполнял это действие и «усталость» еще не накопилась); соответственно не накапливается и «голод» и, восприняв следующую «пищу», автомат «не съедает» ее, а «несет с собой». В течение дальнейших шести шагов «пп-

Таблица 23

| СУТ-таблица реакций $A_0$ в $S_1$ | |  | | |
|---|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 5 6 7 | 8 9 10 11 | 12 13 14 15 16 17 | 18 |
| СУТ-2 | ПО ПО Э ПО ПО Э Ш | ПО Э Э Ш | ЭЭ Э ПО Э Э Ш | РЦ |
| ПО | зВ зв зв пп пп пп зв | зв пп пп пп | др пп пп пп зв зв | пп |
| Э | — сх нт нт нт ну нт | нт нт нт сх | нт нт нт ну нт нт | нт |
| Ж | бс дт дт дт дт нд нд | нд дт дт дт | нд нд дт дт дт дт | нд |

| | | | | «Спит» |
|---|---|---|---|---|
| 19 20 21 | 22 23 24 25 26 | 27 28 | 29 30 31 32 | 33 34 35 36 |
| Э Э Ш | ПО ПО Э Э Ш | ПО Ш | Э Э Ж Ш | АД ПО ПО ПО |
| пп пп пп | зв пп пп др пп | пп пп | пл пл пп пп | пп пл пл пп |
| ну нт нт | нт ну ну нт нт | нт ну | нт нт нт сх | ну нт нт нт |
| нд дт дт | дт нд нд дт дт | дт нд | нд нд дт дт | нд нд дт дт |

| | «Гст» | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 37 | 38 39 40 41 42 | 43 44 45 | 46 47 48 49 | 50 51 | 52 53 | 54 |
| Ш | АД ПО ПО ПО Ш | Ж Ж Ш | Р Р ПО Ш | РЦ Ш | РЦ Ш | Э |
| пп | пп пп пп пп пп | зв зв пп | пп зв пп пп | пп зв | пп пп | пп |
| уд | уд уд уд нт уд | уд уд уд | уд сх сх сх | нт сх | сх нт | нт |
| дт | нд нд дт дт дт | нд нд дт | дт дт нд нд | нд дт | дт дт | нд |

ща» остается не съеденной («голод» не накопился). Затем автомат «видит зверя», возникает «страх» и автомат «бросает пищу», продолжает путь и через некоторое время «съедает» другой объект «пища».

Из рисунка видно также, что действие «создать убежище» автомат выполняет, как правило, в тех случаях, когда в течение некоторого времени воспринимает раздражитель

класса «зверь». Это действие является, таким образом, своеобразной реакцией на восприятие «плохих» ситуаций и имеет компенсирующее значение, так как восприятие «убежища» вызывает возбуждение $i$-моделей «положительных чувств». Видно, кроме того, что действие «спать» выполняется всегда в тех ячейках, где имеется «убежище». Обе эти реакции в явном виде автомату не задавались.

На основании описанных экспериментов можно сделать вывод, что принятый вариант предорганизации обеспечивает адекватное поведение автомата и может быть признан удовлетворительным. Отметим, что получение этого результата потребовало проведения значительной работы по настройке модели, связанной с целым рядом коррекций исходного варианта предорганизации М-сети. Необучающийся М-автомат, предорганизацию которого мы исследовали, будем в дальнейшем считать «опорным» вариантом и обозначать символом $A_0$.

Среда, изображенная на рис. 103, характеризуется малой плотностью раздражителей. В дальнейшем для уменьшения затрат машинного времени мы будем исследовать поведение автомата в средах меньшего размера, но с большей плотностью раздражителей. Первую из таких сред — $S_1$ (рис. 104) — получим из варианта рис. 103 путем некоторого его усложнения. Буквой $F$ обозначен ориентир первого этапа плана — цель движения. Точкой старта автомата является ячейка $A$.

Рассматривалось поведение автомата $A_0$ в среде $S_1$. Внешние реакции автомата представлены на рис. 104, внутренние — СУТ-таблицей (табл. 23). Начиная с момента $t_{60}$ траектория автомата зацикливается. Оказывается, таким образом, что автомат $A_0$ в среде $S_1$ план выполнить не в состоянии. Этот результат используется при дальнейшем рассмотрении. Ниже приводятся и оценочные коэффициенты реакций автомата.

Итак, зафиксировав предорганизацию модели, можно приступать к исследованию процессов обучения в ней.

## § 4. *Варианты обучения*

Процессы обучения в модели реализуются путем проторения и забывания связей в М-сети, установлением новых связей и формированием новых $i$-моделей. Последняя возможность обеспечивается функционированием алгоритма $B_{sit}$ (возбуждающего новую, ранее не связанную с другими, «резервную» $i$-модель всякий раз, когда автомат воспринимает новую ситуацию). Различные режимы использования $B_{sit}$ позволяют

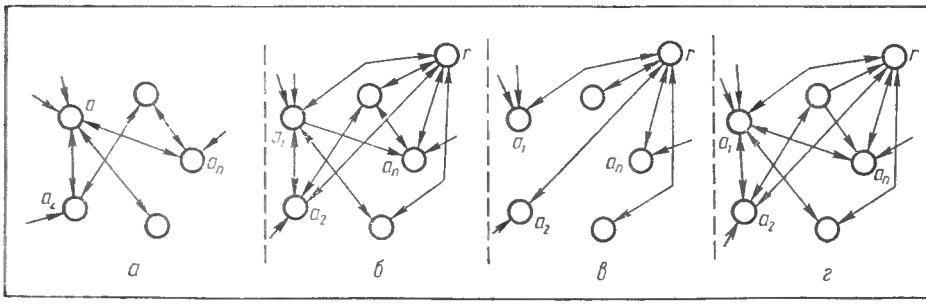



Рис. 105. Запоминание состояний в М-сети.

реализовать существенно отличающиеся друг от друга режимы обучения.

Предположим вначале, что $B_{sit}$ вообще не работает. В этом случае все изменения в сети сводятся только к установлению, проторению и затуханию связей. Автомат, следовательно, способен к обучению. Процессы обучения в таком режиме — режиме изменения весов связей — рассматривались в работах [10, 66]. Ряд особенностей предложенной модели (применение СУТ и пр.) не позволяет непосредственно использовать полученные в этих работах результаты и делает целесообразным специальное изучение адаптационных возможностей М-автомата с изменяющимися весами связей в различных средах. Автомат, реализующий описанный вариант обучения, будем обозначать символом $A_1$.

Пусть теперь $B_{sit}$ функционирует так, как описано в гл. 8. Каждой новой ситуации ставится в соответствие специальная $i$-модель. Между такими $i$-моделями ситуаций устанавливаются связи, фиксирующие порядок восприятия ситуаций автоматом ($B_{as}$). Алгоритм задержанного обучения $B_0$ обеспечивает установление адекватных связей между $i$-моделью каждой из ситуаций и выполненными в них действиями. Автомат, таким образом, оказывается способным «узнавать» ситуации, «вспоминать» их и выбирать в них нужные действия. Кроме того, в таком автомате протекают все те процессы, которые имеют место в варианте $A_1$. Автомат, реализующий описанный режим обучения (режим «памяти ситуаций»), обозначим символом $A_s$.

Следующий режим обучения также связан с использованием $B_{sit}$. В ходе переработки информации автоматом $A_1$ структура его М-сети постоянно изменяется. Устанавливающиеся и меняющиеся связи создают в различные моменты времени новые конфигурации каналов передачи возбуждения между блоками сети и внутри них. Со временем

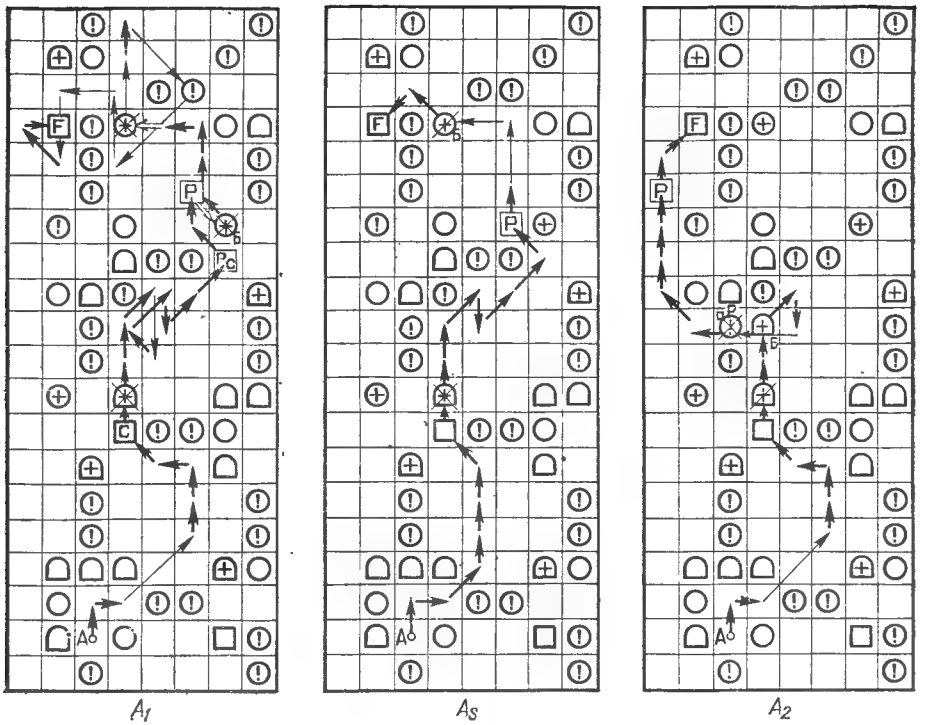



Рис. 106. Внешние реакции М-автоматов $A_1$, $A_s$, $A_2$ в среде $S_1$.

эти конфигурации распадаются и на их месте возникают другие. Каждая такая конфигурация соответствует определенному состоянию автомата и фиксирует в себе некоторую информацию о его внутренних реакциях. В варианте $A_1$ эта «память состояний» является неустойчивой, временной. В М-сети, однако, существует возможность долговременного запоминания собственных состояний. Эта возможность связана с возникновением новых $i$-моделей. Проиллюстрируем ее на условном примере.

Пусть в некоторый момент $t$ возбуждены определенные $i$-модели $a_1, \ldots, a_n$ и между ними установлены связи с высокой проходимостью — создана некоторая их конфигурация $\rho$ (рис. 105, *а*). Пусть в этот же момент оказалась возбужденной «резервная» $i$-модель $r$. Между нею и $i$-моделями $a_1, \ldots, a_n$ установятся связи (рис. 105, *б*). Потребуем, чтобы эти связи затухали медленно ($\beta$, $\hat{\beta}$ для них велики). Через некоторое время возбуждения $i$-моделей могут затухнуть и конфигурация $\rho$ начнет распадаться из-за затухания части свя-

Таблица 24

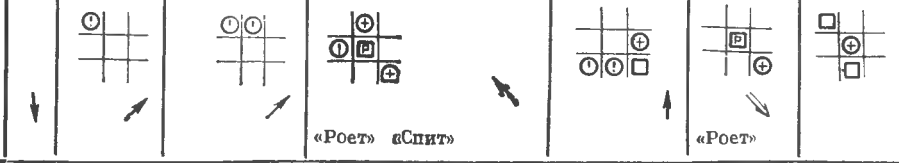
| СУТ-таблица реакций $A_1$ в $S_1$ |  «Роет» «Спит» «Роет» | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| СУТ-2 | ДР | РЦ | Ш | РЦ | ПО | Ш | РД | АД | АД | АД | Ш | РЦ | РЦ | Ш | АД | НП | АД | АД |
| ПО | др | зв | зв | зв | пп | пш | пл | зв | пп | пп | уб | пщ | пл | пп | пп | др | пл | пл |
| Э | гл | нт | гл | нт | рд | уд | гл | нт | гл | бп | уд | бп | нт | нв | нв | гн | нт | сх |
| Ж | дт | ст | нд | от | бс | — | дт | ст | нд | нд | дт | нд | — | дт | дт | дт | — | дт |

Таблица 25

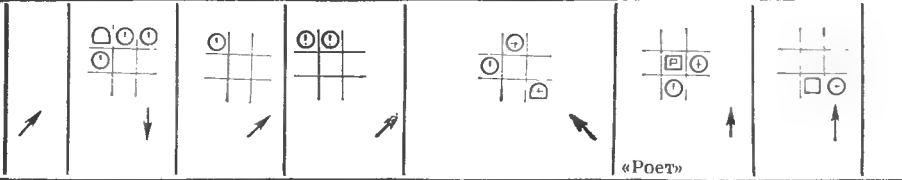
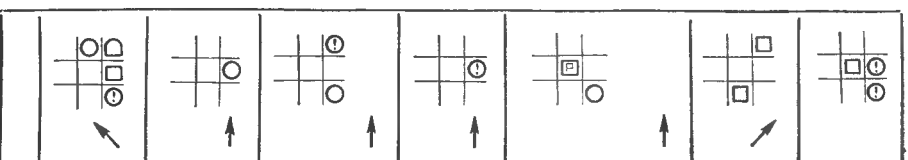
| СУТ-таблица реакций $A_2$ в $S_1$ |  «Роет» | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| СУТ-2 | Ш | РЦ | Ш | ПО | Ш | Э | Ш | Э | Э | Э | АД | Ш | АД | РЦ | Ш | РЦ | Ш | РЦ |
| ПО | уб | пл | др | пш | зв | уб | уб | уб | пл | уб | пл | уб | пш | уб | зв | пп | пш | зв |
| Э | гн | бп | уд | ус | уд | ус | уд | ус | нт | гл | нт | ус | нт | бп | рд | лб | сх | уд |
| Ж | ст | бс | сп | нд | нд | нд | ст | нд | нд | ст | нд | сп | нд | дт | нд | бс | бс | бс |

Таблица 26

| СУТ-таблица реакций $A_3$ в $S_1$ |  «Ест» «Роет» | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| СУТ-2 | Ш | ПО | Ш | РЦ | Ш | РЦ | АД | Ш | РЦ | Ш | РЦ | АД | РЦ | Ш | РЦ | Ш | РЦ | ПО |
| ПО | пл | дв | зв | пп | пл | зв | зв | дв | дв | зв | дв | пщ | пш | пл | пл | уб | зв | уб |
| Э | лб | ус | гн | ув | уд | гл | уд | ус | уд | гл | сх | нт | нд | ус | нт | ус | нт | уд |
| Ж | от | нд | ст | дт | — | нд | — | сп | — | дт | от | бс | от | нд | ст | нд | — | дт |

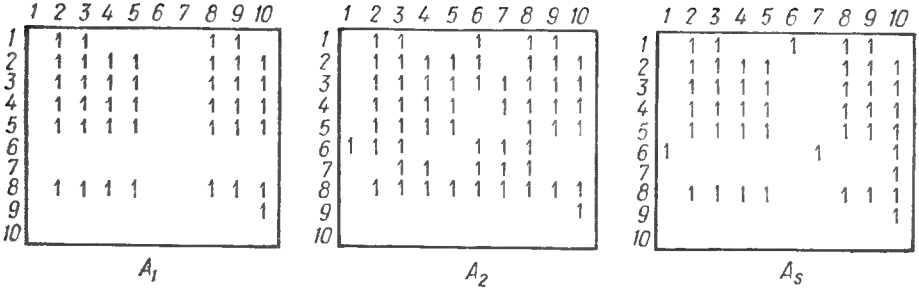



Рис. 107. Разрешающие матрицы обучения М-автоматов.

зей (рис. 105, *в*). Если в этом состоянии вновь окажется возбужденной $i$-модель $r$ (от других аналогичных $i$-моделей состояний или от возбудившихся в ходе работы сети некоторых из $i$-моделей $a_1, \ldots, a_n$), то возбуждение $r$ передастся на все $i$-модели $a_1, \ldots, a_n$, связи между ними проторятся и конфигурация $\rho$ окажется восстановленной (рис. 105, *г*). Таким образом, формирование $i$-моделей конфигураций (состояний) обеспечивает их долговременное запоминание. Можно предположить, что формирование новых конфигураций обусловлено поступлением в сеть новой информации. Последнее связано с перемещением автомата из одной ситуации в другую. Оказывается, таким образом, что в качестве $i$-моделей состояний могут быть использованы «резервные» $i$-модели блока ПС. Такое их использование обеспечивается работой алгоритма $B_{sit}$ при наложении следующих ограничений: установление связей между $i$-моделями ситуаций и действий будем считать запрещенным, а установление связей между $i$-моделями ситуаций и всеми остальными $i$-моделями сети — разрешенным. Автомат, реализующий такой режим обучения (режим «памяти состояний»), обозначим символом $A_2$.

Исследуем эффективность различных режимов обучения, помещая автоматы $A_1$, $A_s$ и $A_2$ в среду $S_1$. О качестве обучения будем судить по значениям введенных выше оценочных коэффициентов. Внешние реакции автоматов изображены на рис. 106. Фрагменты внутренних реакций представлены в табл. 24—26. Видно, что все автоматы выполнили план. «Трудное место», через которое не смог пройти опорный вариант $A_0$, автоматы преодолели с разной степенью эффективности. Серию неудачных шагов автомата $A_1$ в области ячейки $F$ можно пояснить восприятием большого количества отрицательных раздражителей («паника»). Автомат $A_2$ в этой области «вел» себя лучше, поскольку случайно (выполняя шаг «быстро») попал на «пищу» и «съел» ее. $A_1$ также «на-

падал» на «пищу», но действия «есть» не выполнил, так как его «внимание» (СУТ-2) было привлечено в это время к состоянию сферы эмоций.

Конкретные различия в вариантах обучения автоматов видны из рис. 107, где представлены «разрешающие матрицы» вариантов. Строки и столбцы этих матриц соответствуют блокам М-сети. Использована нумерация блоков, приведенная на рис. 93. Единица на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца означает, что обучение и установление связей, направленных от $i$-моделей блока $i$ к $i$-моделям блока $j$ разрешено. Отсутствие единицы означает запрет соответствующих операций. В экспериментах использовались значения параметров обучения, определенные ранее в тестах гл. 9. (Для связей блока ПС в $A_2$ было принято $\beta = \tilde{\beta} = 0{,}95$.) Значения оценочных коэффициентов, полученные в описанных экспериментах, приведены в табл. 27. Отметим, что оценка $e$ подсчитывалась по времени, которое автоматы находились на одном или сходных участках среды. При подсчете $\hat{\gamma}$ в качестве ячейки $g_{\text{н}}$ принималась ячейка $A$, а $g_{\text{ф}}$ — ячейка $F$.

Из таблицы следует, что выработанная опорным вариантом $A_0$ оценка $e$ существенно улучшена всеми обучающимися вариантами и более всего — автоматом $A_2$. Обратная картина наблюдается для оценки адекватности $\hat{\beta}$. Здесь она минимальна для $A_2$ и максимальна для $A_0$. Обучающиеся варианты «чувствуют себя» в среде лучше, чем $A_0$, но «платят» за это уменьшением адекватности реакций. Однако все значения $\hat{\beta}$ находятся в допустимой области. Таким образом, можно сделать предварительный вывод: если для каких-либо целей необходим автомат, обеспечивающий высокую оценку качества функционирования, а адекватность его внутренних реакций не важна, то следует выбрать автомат типа $A_2$. Если же, напротив, важна только адекватность внутренних реакций, наилучшим явится вариант $A_0$. Этот вывод, впрочем, применим только к среде $S_1$. Необходимо проверить,

Таблица 27

| Автомат | Оценки реакций в среде | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $e$ | $l_{\text{л}}$ | $l_{\text{э}}$ | $\hat{\beta}$ | $\hat{\gamma}$ |
| $A_0$ | —48 | 0,95 | 0,77 | 0,72 | — |
| $A_1$ | — 9,4 | 0,88 | 0,64 | 0,52 | 0,44 |
| $A_2$ | 2,8 | 0,66 | 0,53 | 0,13 | 0,75 |
| $A_8$ | —10,8 | 0,83 | 0,78 | 0,61 | 0,75 |

не изменится ли характер поведения автоматов в средах других типов. Для ответа на этот вопрос были проведены эксперименты в разных средах.

Данные табл. 27 показывают, что оценки автомата $A_s$ занимают промежуточное положение по отношению к оценкам $A_1$ и $A_2$ ($e$ и $\hat{\beta}$ близки к $A_1$, $\hat{\gamma}$ — к $A_2$). Это легко объясняется тем обстоятельством, что основные преимущества «памяти ситуаций» могут проявиться, когда среда содержит часто повторяющиеся ситуации или такова, что для организации удовлетворительного поведения необходимо помнить последовательности реакций и их результатов. Среда $S_1$ не обладает указанными свойствами. Очевидно, автомат $A_s$ имеет смысл использовать только в средах (например, в регулярных), где такие свойства хорошо выражены. Поэтому в дальнейшем мы не будем исследовать $A_s$ в «невыгодных» для него условиях.

## § 5. *Эксперименты с М-автоматами в различных средах*

Из рис. 104 видно, что среда $S_1$ содержит значительное количество раздражителей класса «зверь». Представляет интерес рассмотреть реакции автомата в более «приятной» для

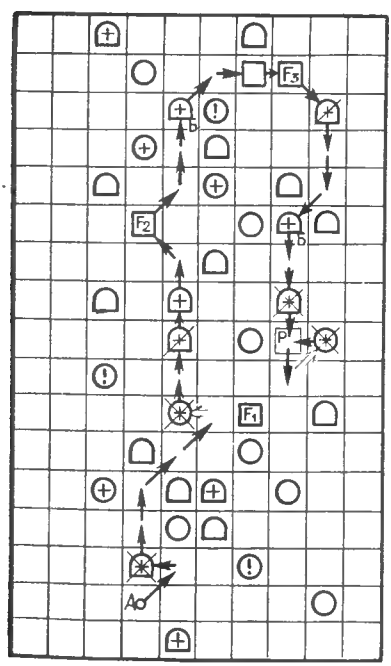
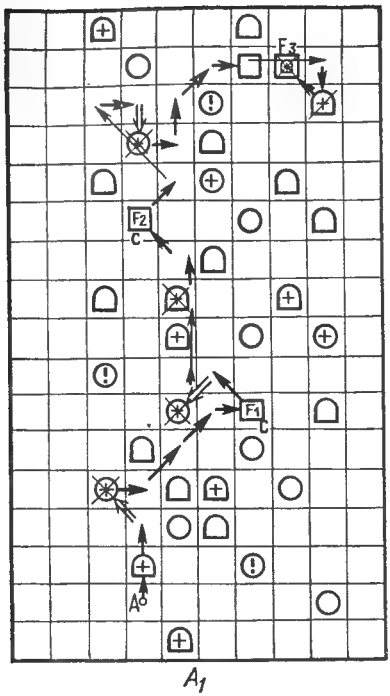



Рис. 108. Внешние реакции $A_0$ в среде $S_2$.



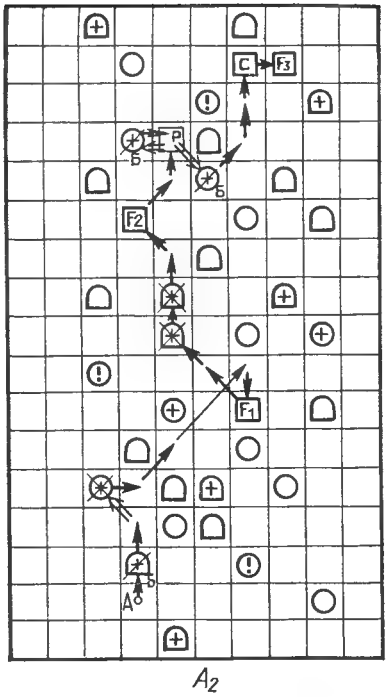




Рис. 109. Внешние реакции М-автоматов $A_1$ и $A_2$ в среде $S_2$.

него среде. Такая среда $S_2$, содержащая большее количество раздражителей класса «пища», представлена на рис. 108. Здесь $A$ — исходная ячейка, $F_1$, $F_2$, $F_3$ — ориентиры первого, второго и третьего этапов плана. Прежде всего в ячейку $A$ был помещен автомат $A_0$. Его внешние реакции представлены на рис. 108, внутренние — в табл. 28. Затем аналогичные

Таблица 28

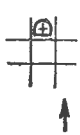
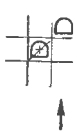
| СУТ-таблица реакций $A_0$ в $S_2$ | | «Ест» | | | |  | | «Нести» | |  | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| СУТ-2 | НП | АД | РЦ | ПО | Ш | Э | Ш | АД | Ш | АД | Ш | АД | Ш | ПО | Э | Э | Э | Э |
| ПО | пл | пл | зв | пп | пп | др | др | др | пп | пп | др | др | пл | пл | пл | др | др | пл |
| Э | гн | уд | уд | ув | ув | уд | уд | уд | ув | уд | уд | рд | рд | уд | уд | уд | рд | рд |
| Ж | дт | нд | нд | дт | дт | дт | нд | нд | дт | дт | дт | нд | нд | нд | дт | дт | дт | сп |

Таблица 29

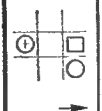
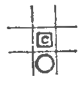
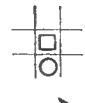
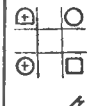
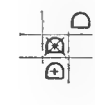
| СУТ-таблица реакций $A_1$ в $S_2$ |  |  «Спит» | |  |  | «Ест» | |  «Ест» |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 19 20 | 21 22 23 | 24 25 | 26 27 | 28 29 | 30 31 32 | 33 34 | 35 36 |
| СУТ-2 | РЦ Ш | АД РЦ Ш | РЦ Ш | РЦ Ш | РЦ НП | АД АД Ш | РЦ Ш | АД ПО |
| ПО | пп пщ | уб зв пп | пп пщ | пл пл | др пп | пп уб зв | пщ пщ | пп пп |
| Э | бк уд | нд бп нд | сх уд | гн бп | лб ну | бк сх ув | рд уд | уд бп |
| Ж | дт ст | нд ст нд | ст нд | от дт | дт ст | от — дт | дт бс | — нд |

Таблица 30

| СУТ-таблица реакций $A_2$ в $S_2$ | | | | «Ест» | «Ест» | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 19 20 21 | 22 23 | 24 25 26 | 27 28 29 | 30 31 32 33 | 34 35 36 |
| СУТ-2 | Э АД Ш | Э Ш | РЦ ПО Ш | АД АД Ш | АД Э Э Ш | РЦ Э Э |
| ПО | уб уб уб | зв пп | дА уб пл | уб пп уб | пп уб зв уб | пщ уб уб |
| Э | рд Пр гр | бц ув | Пр ув уд | гл нт гл | нт гн нт гл | нт ув нт |
| Ж | дт — дт | дт нд | — дт нд | дт — нд | ст нд — дт | ст нд — |

Таблица 31

| Автомат | Оценки реакций в среде | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $e$ | $l_л$ | $l_э$ | $\hat{\beta}$ | $\hat{\nu}$ |
| $A_0$ | 33,6 | 1,0 | 0,6 | 0,6 | 0,82 |
| $A_1$ | 10,7 | 0,83 | 0,65 | 0,48 | 0,67 |
| $A_2$ | 3,1 | 0,79 | 0,63 | 0,42 | 0,74 |

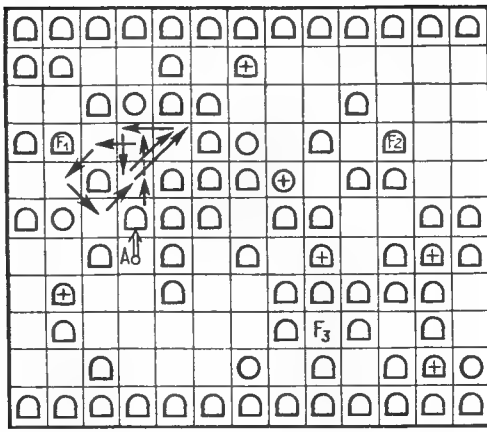



Рис. 110. Внешние реакции $A_0$ в среде $S_3$.

исследования были проведены с обучающимися вариантами $A_1$ и $A_2$ (рис. 109, табл. 29 и 30). Оценочные коэффициенты приведены в табл. 31. При подсчете $\hat{\gamma}$ ячейке $g_н$ соответствует ячейка $A$, ячейке $g_ф$ — $F_3$. Из таблицы следует, что в случае «приятной» среды все обучающиеся варианты автомата оказываются хуже необучающегося. Более того, имеющий в среде $S_1$ максимальную оценку $e$ автомат $A_2$ в среде $S_2$ имеет минимальную оценку. Адекватность же его внутренних реакций в $S_2$ по сравнению с $S_1$ существенно повысилась. Предварительный вывод: исследуемые алгоритмы обучения не являются универсальными относительно свойств среды, их эффективность существенно зависит от этих свойств. Чтобы полнее рассмотреть характер предполагаемой зависимости, продолжим исследование автоматов в другой среде — $S_3$.

Среда $S_3$, представленная на рис. 110, содержит преимущественно раздражители класса «препятствие», не являющиеся для автомата ни «опасными», ни «съедобными». Выше было показано, что эти раздражители также оцениваются автоматом как «неприятные», вызывая, однако, другие по сравнению с «опасностью» внутренние реакции. Автоматы стартовали из ячейки $A$, ячейки $F_1$, $F_2$, $F_3$ — ориентиры последовательных этапов плана. На рис. 110 показаны внешние реакции автомата $A_0$. Видно, что автомат выполнил только первый этап плана (напомним, что этап считается выполненным, если автомат занимает любую ячейку в окрестности ориентира). Его внутренние реакции представлены в табл. 32. Поведение автоматов $A_1$ и $A_2$ показано на рис. 111 и в табл. 33 и 34. Оценочные коэффициенты приведены в табл. 35. Значение $e$ вычислялось для всех автоматов по совпадающим или близким участкам траектории. При вычис-

Таблица 32

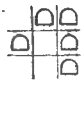
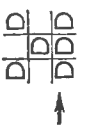
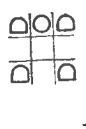
| СУТ-таблица реакций $A_0$ в $S_3$ |  |  | |  | |
|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 5 | 6 7 | 8 9 | 10 11 12 13 | 14 15 16 17 18 |
| СУТ-2<br>ПО<br>Э<br>Ж | ПО ПО ПО ПО НП<br>дВ дВ др др пп<br>— нв нв нт нт<br>дс бс дт дт дт | ПО Ш<br>пп др<br>нт нт<br>нд нд | РЦ Ш<br>др пп<br>ну нт<br>дт дт | РЦ Э АД Ш<br>пп пп др пп<br>нт нт нт ну<br>дт дт нд нд | ПО ПО ПО Э Ш<br>пп пп пп др цп<br>ну нт нт нт нт<br>нд дт дт дт дт |

Таблица 33

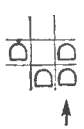
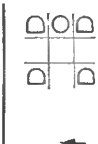
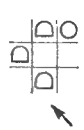
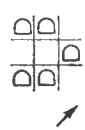
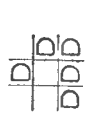
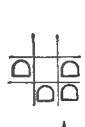
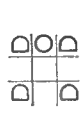
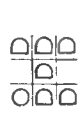
| СУТ-таблица реакций $A_1$ в $S_3$ | |  |  |  |  | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 | 5 6 | 7 8 | 9 10 | 11 12 | 13 14 15 16 | 17 18 |
| СУТ-2<br>ПО<br>Э<br>Ж | ПО ПО ПО НП<br>дВ дВ пп дВ<br>— нв гп ну<br>дт бс дт бс | Э Ш<br>др пп<br>нт нт<br>нд — | ПО Ш<br>дВ зв<br>рд нт<br>дт от | РЦ Ш<br>пп зв<br>уд нт<br>нд от | РЦ Ш<br>дВ пп<br>гл нт<br>нд от | ПО ПС ПС Ш<br>пп пп пл пп<br>ув Пр Пр гл<br>бс сп ст ст | ПС ПС<br>пп пп<br>гл нт<br>ст ст |

Таблица 34

| СУТ-таблица реакций $A_2$ в $S_3$ |  |  |  | | | |  |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 | 5 6 | 7 8 | 9 10 | 11 12 | 13 14 | 15 16 17 18 |
| СУТ-2<br>ПО<br>Э<br>Ж | ПО ПО ПО НП<br>дВ дВ пп дВ<br>— нв гп ну<br>дт бс дт бс | Э Ш<br>дВ др<br>нт ув<br>нд ст | ПО Ш<br>зВ зв<br>рд Пр<br>дт сп | РЦ Ш<br>пп зв<br>рд ув<br>нд ст | РЦ Ш<br>зВ пщ<br>нт гл<br>дт сп | ПО Ш<br>пп зв<br>нт нт<br>дт бс | ПС ПС ПО Ш<br>зВ — дВ зв<br>нт бц рд Пр<br>дт — дт ст |

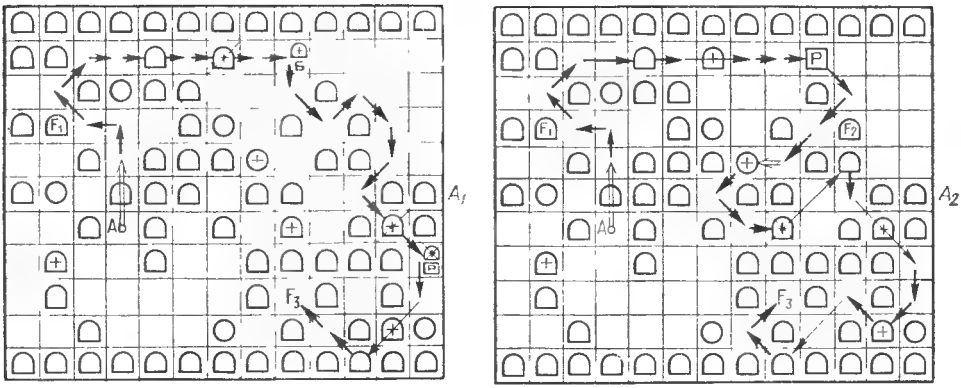



Рис. 111. Внешние реакции М-автоматов $A_1$ и $A_2$ в среде $S_3$.

Таблица 35

| Автомат | Оценки реакций в среде | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $e$ | $I_л$ | $I_э$ | $\hat{\beta}$ | $\hat{\gamma}$ |
| $A_0$ | —70,4 | 1,0 | 0,94 | 0,94 | — |
| $A_1$ | —46,3 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,75 |
| $A_2$ | —18,7 | 0,62 | 0,71 | 0,33 | 0,75 |

лении $\hat{\gamma}$ отождествлялись ячейки $g_н$ и $A$, а также $g_ф$ и $F_2$. Из таблицы видно, что в среде $S_3$ обучающиеся автоматы опять имеют преимущество и максимальная оценка $e$ выработана $A_2$. Обсуждение полученных результатов удобно привести ниже.

Мы видели, что зависимость оценочных коэффициентов от характера среды более четко проявляется для автомата $A_2$. Интересно поэтому рассмотреть режим обучения с «памятью состояний» более подробно.

## § 6. *Влияние памяти М-автомата на адекватность его внутренних реакций*

Из данных предыдущего параграфа следует, что в поведении автомата $A_2$, реализующего режим обучения с «памятью состояний», наблюдается следующая закономерность: чем «хуже» среда, в которой он действует, тем относительно выше оценка качества его функционирования и тем ниже оценка адекватности его внутренних реакций. Представляет

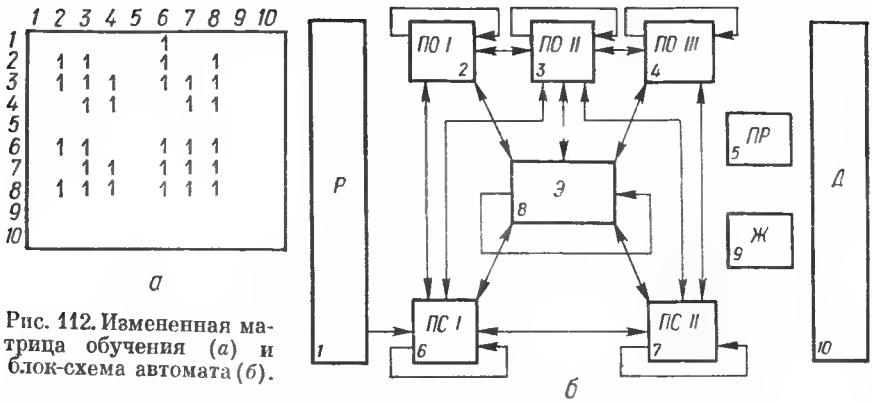



Рис. 112. Измененная матрица обучения (*а*) и блок-схема автомата (*б*).

интерес попытка улучшить значения $\hat{\beta}$, не ухудшая существенно $e$.

Очевидно, в процессе формирования оценок немаловажную роль играют особенности памяти автомата. В нашем случае память реализуется совокупностью связей М-сети. Наиболее общей характеристикой сети является количество имеющихся в ней связей и их конфигурация. Разрешающая матрица обучения (см. рис. 107) для $A_2$ допускает установление весьма большого количества разнообразных связей. Можно предположить, что среди них существуют как связи, мало влияющие на поведение автомата, так и связи, приводящие к нежелательным процессам в сети. Поэтому может оказаться целесообразным уменьшить объем памяти автомата.

В настоящее время не существует строгих методов анализа оптимальности разрешающих матриц, и при их изменении приходится опираться на интуитивные рассуждения. Последние сводятся в нашем случае опять к представлениям о «логическом» и «эмоциональном» каналах переработки информации. Ограничим разрешающую матрицу таким образом, чтобы связи устанавливались в центральных блоках этих каналов — ПО, ПС и Э,— а также между ними. Локализуя таким образом процессы обучения, мы уменьшаем общее количество связей, устанавливающихся в сети в ходе обучения, уменьшаем влияние на характер поведения второстепенных совпадений и увеличиваем удельный вес пред-

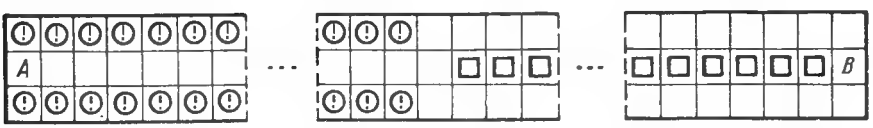



Рис. 113. Тестовая ситуация.

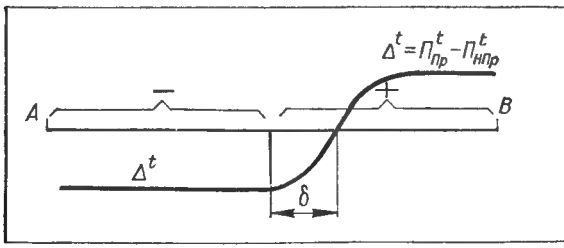



Рис. 114. Ожидаемые реакции М-автомата в тестовой ситуации.

организации в формировании поведения. Все это должно привести к улучшению характеристик последнего. Измененная соответствующим образом разрешающая матрица обучения представлена на рис. 112, *а*. Ее иллюстрирует блок-схема на рис. 112, *б*, на которой соединительные линии указывают области, где установление разрешено. Связи предорганизации на рисунке не показаны. Автомат, реализующий эту разрешающую матрицу, обозначим символом $A_3$.

Адекватность поведения автомата во многом определяется «подвижностью» процессов обучения, т. е. способностью автомата быстро изменять оценки при изменении среды. В нашем случае такие способности автомата определяются соотношением активностей процессов проторения и забывания связей, которые, в свою очередь, зависят от значения коэффициентов $k_2$, $\tilde{k}_2$ и $\beta$, $\hat{\beta}$ в выражениях (8.9) и (8.10). Изменять это соотношение можно, очевидно, путем изменения одной какой-либо пары коэффициентов.

Будем исследовать характер изменения реакций автомата, варьируя значения $\beta$ и $\hat{\beta}$. Для этого поместим автомат $A_3$ в тестовую ситуацию, изображенную на рис. 113. В ходе эксперимента автомат перемещается из ячейки $A$ в ячейку $B$. На первой половине пути автомат воспринимает только «отрицательные» раздражители, на второй — «положи-

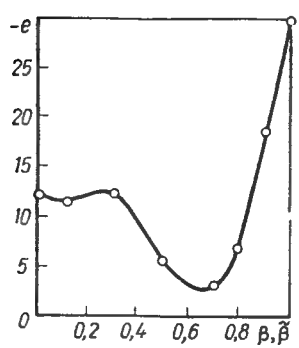



Рис. 115. Зависимость оценки качества функционирования М-автомата от подвижности обучения.

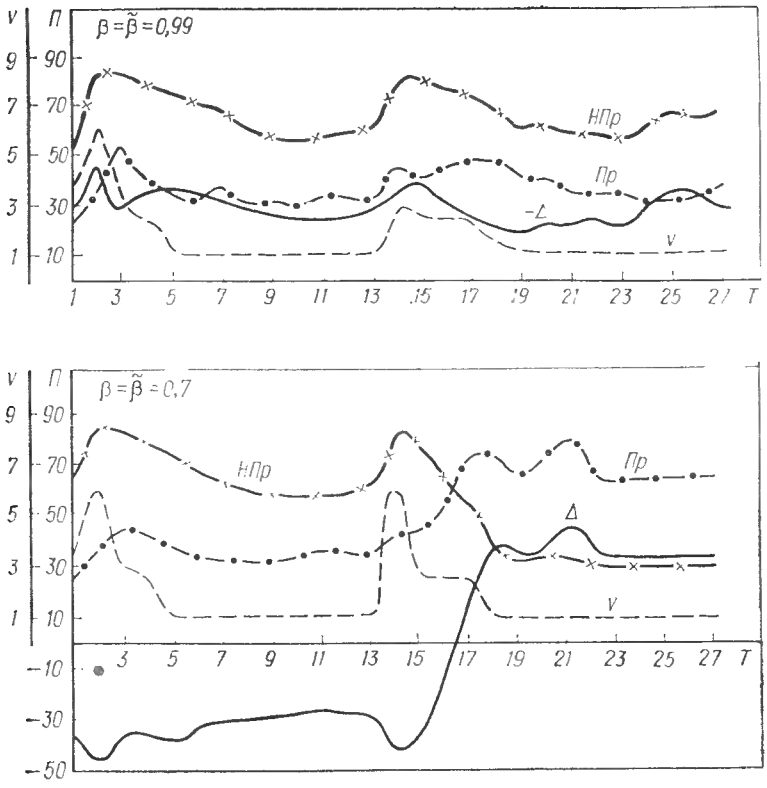



Рис. 116. Реакции М-автомата в тестовой ситуации.

тельные». Адекватными значениями $\Delta(\Delta = П_{Пр} - П_{НПр})$ будут, следовательно, отрицательное значение на первом участке и положительное — на втором. Поскольку автомат вначале воспринимает отрицательные раздражители, можно ожидать, что выработанное им за это время значение Δ (отрицательное) будет сохранять свой знак и в течение некоторого времени δ после перехода в область положительных раздражителей (рис. 114). Время переходного периода δ является в этих условиях характеристикой памяти. Варьируя β и $\hat{\beta}$, будем подбирать такие их значения, при которых δ минимально и, следовательно, значения $e$ максимальны. При всех экспериментах сохраняется равенство $\beta = \hat{\beta}$, значения остальных параметров обучения соответствуют основному варианту.

Результаты эксперимента приведены на рис. 115. Видно, что оптимальные значения коэффициентов принадлежат области $0{,}6 \div 0{,}7$. Однако по условию (9.19) нижняя граница их значений составляет примерно 0,8. Поэтому примем для

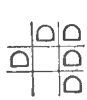
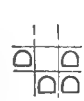
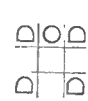
Таблица 36

| СУТ-таблица реакций $A_3$ в $S_1$ | | | |
|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 5 6 7 | 8 9 10 11 12 13 | 14 15 16 17 18 |
| СУТ-2 | ПО ПО ПО ПО Э ПО Ш | ПО ПО ПО ПО ПО Ш | ПО ПО ПО ПО Ш |
| ПО | зВ зв зв шш шш др др | зв зв шш шш др др | зв зв пп шш зв |
| Э | — сх нв нт нт сх сх | сх сх сх ну сх сх | сх нт сх сх сх |
| Ж | бс дт дт дт дт нд нд | нд дт дт дт дт нд | нд дт дт дт дт |

Таблица 37

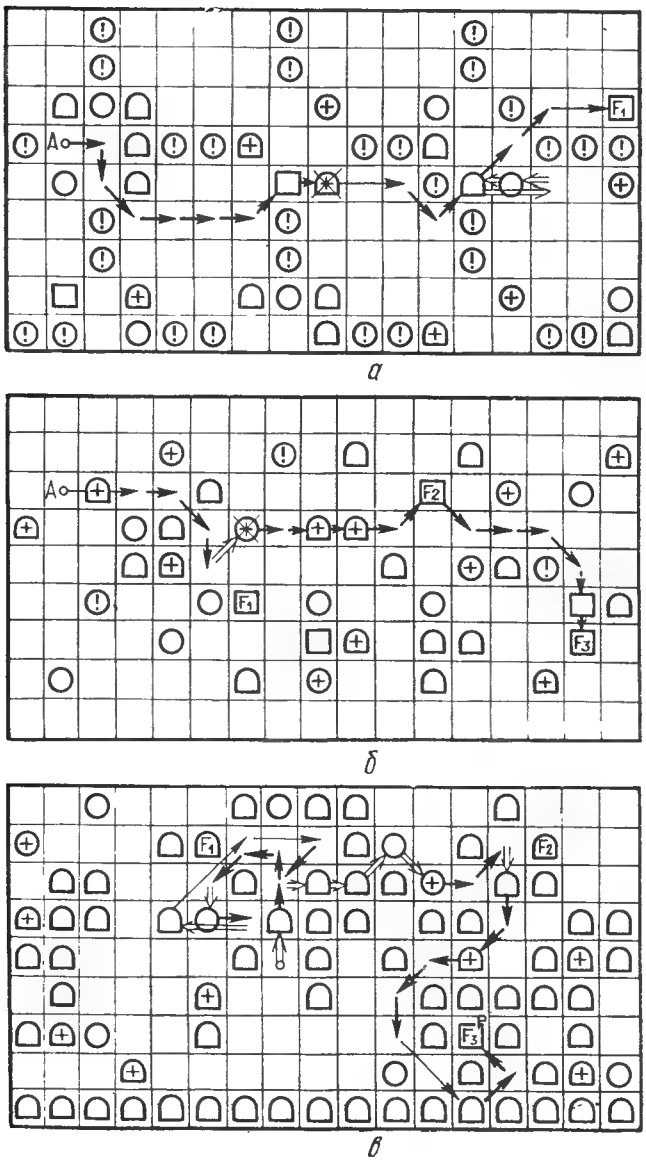
| СУТ-таблица реакций $A_3$ в $S_2$ | | | |
|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 5 | 6 7 8 9 10 11 | 12 13 14 15 16 17 18 |
| СУТ-2 | ПО ПО ПО ПО Ш | ПО ПО ПО ПО ПО Ш | ПО ПО ПО ПО ПО Ш ПО |
| ПО | дА пщ пщ пщ пщ | пщ пщ пщ пщ пщ пщ | пщ пщ пщ пщ пщ пщ пщ |
| Э | — нв нт нт гн | нт нт нт гн нт нт | нт гн гн нт нт нт гн |
| Ж | бс дт дт дт бс | дт дт дт дт нд дт | дт дт дт бс дт дт дт |

Таблица 38

| СУТ-таблица реакций $A_3$ в $S_3$ |  | |  |  | |
|---|---|---|---|---|---|
| Блоки | 1 2 3 4 5 | 6 7 | 8 9 | 10 11 | 12 13 14 15 16 17 18 |
| СУТ-2 | ПО ПО ПО ПО НП | ПО Ш | РЦ Ш | РЦ Ш | ПО ПО ПО ПО Ж Ш ПО |
| ПО | дВ дВ др др пш | пп пш | др др | оп пш | пш др др пп шп пл пш |
| Э | — нв нв нт нт | нт нт | нт уд | гн уд | нт бц бц гн бц бц бц |
| Ж | дт бс дт дт дт | нд нд | нд дт | дт нд | дт дт дт бс дт дт дт |

автомата $A_3$, реализующего режим обучения с «памятью состояний» по сокращенной разрешающей матрице, значения коэффициентов забывания связей $\beta = \hat{\beta} = 0{,}8$.

Из графика на рис. 115 следует, что как слишком большая, так и слишком малая подвижность обучения не является оптимальной. На рис. 116 приведены в качестве при-




*а* *б* *в*

Рис. 117. Внешние реакции $A_8$ в средах $S_1$ (*а*), $S_2$ (*б*), $S_3$ (*в*).

Таблица 39

| Среда | Оценки реакций автомата | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $e$ | $I_л$ | $I_э$ | $\hat{\beta}$ | $\hat{\gamma}$ |
| $S_1$ | —10,8 | 0,83 | 0,85 | 0,68 | 0,77 |
| $S_2$ | 41 | 0,92 | 0,82 | 0,74 | 0,93 |
| $S_3$ | 18,6 | 0,85 | 0,93 | 0,78 | 0,53 |

мера кривые изменения некоторых реакций автомата в ходе эксперимента. Видно, что предположения рис. 114 оправдываются.

Кривые $V$ на рисунке изображают изменения времени нахождения автомата в каждой из ситуаций (в единицах дискретного времени). Таким образом, $V$ — это время «обдумывания» автоматом шага или время «принятия решения». Видно, что $V$ резко возрастает при изменении характера воспринимаемых ситуаций. Одновременно возрастает и $П_{нпр}$ (автомат «встревожен» изменением среды, к которой успел уже «привыкнуть»). Реакции такого рода в явном виде автомату не задавались.

Исследуем реакции автомата $A_3$ в описанных ранее средах. Эксперименты проводились по тем же правилам, что и для автоматов $A_0$, $A_1$ и $A_2$. Внешние реакции $A_3$ в разных средах приведены на рис. 117, внутренние — в табл. 36—38. В табл. 39 представлены оценки реакций автомата. Ясно, что оценки адекватности удалось существенно улучшить, не ухудшив оценки $e$.

## § 7. *Обсуждение результатов*

Чтобы упростить в дальнейшем использование оценочных коэффициентов, преобразуем оценку $e$ в более удобную форму. Пусть оценка качества функционирования выражается некоторым коэффициентом $\hat{\alpha}$. Потребуем, чтобы $\hat{\alpha}$, как и все остальные коэффициенты, изменялся в пределах $0 \div 1$ и наихудшей оценке соответствовало бы его значение 0, а наилучшей — 1. Примем в качестве вероятной оценки верхней границы $e$ среднюю величину возбуждения (см. табл. 7) $i$-модели $Пр : П_{ср} = 100$. Аналогично оценим и нижнюю границу. Таким образом, изменение значения $e$ будет происходить в границах $-100 — +100$. Отобразим этот диапазон на отрезок $-1 — +1$. Тогда

$$\hat{\alpha} = 0{,}5\,(1 + 0{,}01e). \qquad (10.7)$$

Таблица 40

| Оценочные коэффициенты | Значения оценок реакций в средах | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $S_1$ | | | | $S_2$ | | | | $S_3$ | | | |
| | автоматов | | | | | | | | | | | |
| | $A_0$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_0$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_0$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
| $\alpha$ | 0,26 | 0,45 | 0,52 | 0,45 | 0,67 | 0,56 | 0,51 | 0,70 | 0,15 | 0,27 | 0,41 | 0,60 |
| $\beta$ | 0,72 | 0,52 | 0,13 | 0,68 | 0,60 | 0,48 | 0,42 | 0,74 | 0,94 | 0,60 | 0,33 | 0,78 |
| $\gamma$ | — | 0,44 | 0,75 | 0,77 | 0,82 | 0,67 | 0,74 | 0.93 | — | 0,75 | 0,75 | 0,53 |

Значения $\hat{\alpha} > 0{,}5$ соответствуют оценкам $e$ с положительным знаком, $\hat{\alpha} < 0{,}5$ — с отрицательным.

Все оценочные коэффициенты, полученные в ходе экспериментов, сведены в табл. 40. На рис. 118 показаны отдельно характеристики адекватности реакций. Видно, что все представляющие точки расположены внутри допустимой области. Точки, соответствующие каждому из автоматов, расположены компактными группами, внутри которых наблюдаются разбросы, обусловленные различиями сред.

Из табл. 40 видно, что различные оценки изменяются по-разному в зависимости от характера среды. Было бы полезно представить эту зависимость в наглядной форме. Для этого необходимо ввести в рассмотрение некоторый числовой параметр $s$, характеризующий среду. Потребуем, чтобы $s$ был отрицательным в случае «плохих» для автоматов сред и положительным — для «хороших», а также чтобы $|s|$ имел тем большее числовое значение, чем полнее выражен тип среды.

Выше мы упоминали уже о двойственном характере оценки качества функционирования автомата в среде ($e$). В слу-

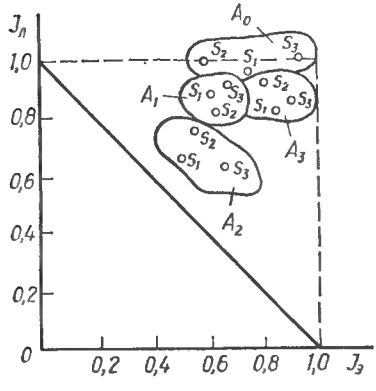



Рис. 118. Оценки адекватности реакций М-автоматов $A_0$, $A_1$, $A_2$, $A_3$ в средах $S_1$, $S_2$, $S_3$.

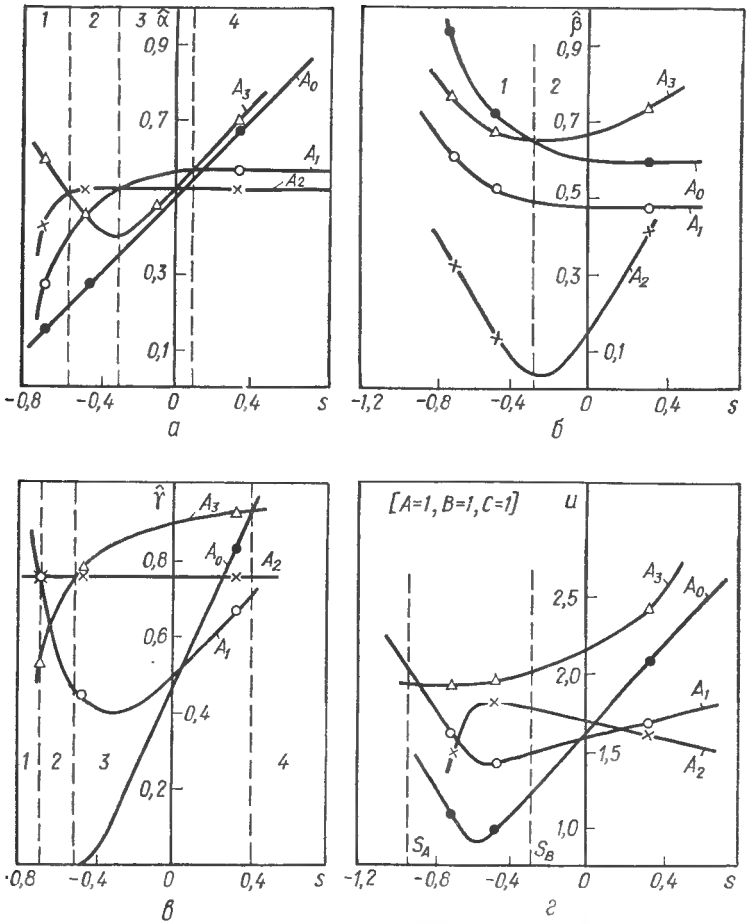



Рис. 119. Изменения оценок в зависимости от характера среды.

чае, если автомат с неизменяющейся структурой находится в разных средах, то вырабатываемый им коэффициент $e$ зависит только от типа среды и может рассматриваться как ее оценка. Из всех рассмотренных нами автоматов только опорный вариант $A_0$ не менял своей структуры в различных экспериментах. Естественно поэтому рассматривать вырабатываемую им в разных средах оценку $e$ (будем обозначать ее $e_0$) в качестве оценки этих сред. Таким образом, опорный вариант $A_0$ может служить своеобразным «измерителем» сред. Поскольку его реакции определяются заданной предорганизацией, то, используя вырабатываемую им оценку среды $e_0$ в качестве параметра $s$, будем оценивать среды «с точки врения» заданных нами основных свойств автомата.

Для того чтобы выполнить требования, предъявленные

выше к значению и знаку $s$, отобразим диапазон изменений $e_0$ (−100—+100) на отрезок −1—+1. Тогда, с учетом (10.7),

$$s = \frac{e_0}{100} = 2\hat{\alpha} - 1. \tag{10.8}$$

На рис. 119 приведено графическое изображение зависимости оценочных коэффициентов от $s$. Видно, что на всем исследованном диапазоне сред всегда имеется хотя бы один обучающийся автомат, функционирующий лучше опорного необучающегося варианта не менее чем по двум оценкам. Для разных сред наилучшими являются разные автоматы. Так, на участках *1* и *4* наибольшую оценку $\hat{\alpha}$ дает автомат $A_3$, на участке *2* — $A_2$, на участке *3* — $A_1$. Наиболее близкие значения $\hat{\alpha}$ (0,5—0,55) автоматы вырабатывают в «нейтральных» средах ($s \approx 0$). Наиболее адекватные реакции (рис. 119, *б*) вырабатывают автоматы $A_0$ и $A_3$. При этом в самых «плохих» средах «разумнее» ведет себя необучающийся вариант. Он же обеспечивает наилучшие траектории в «очень хороших» средах (участок *3* на рис. 119, *в*). В «очень плохих» средах (участок *1*) лучшими являются траектории $A_1$, хотя его оценки $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ здесь невелики. В средах, близких к нейтральным, быстро достигает цели $A_3$ (участок *3* на рис. 119, *в*).

Итак, нами исследовано поведение четырех различных вариантов М-автомата в средах трех типов. Число вариантов можно легко увеличить за счет различных сочетаний значений параметров обучения. Поведение каждого из таких вариантов можно рассматривать в более представительном множестве сред, конструируемых путем изменения плотности воспринимаемых автоматами раздражителей. Методика исследования во всех этих случаях ничем не будет отличаться от описанной выше. Проведенные исследования могут служить примером, иллюстрирующим способы изучения сложных самообучающихся М-автоматов. Опираясь на этот пример, рассмотрим ряд задач, решение которых оказывается возможным на основе полученных при использовании этой методики результатов.

Предварительно сделаем следующее замечание. Вообще говоря, могут существовать отличающиеся друг от друга среды, обладающие тем свойством, что оценки $s$, вырабатываемые для этих сред опорным вариантом, близки друг к другу, а оценки, вырабатываемые для этих же сред любым из обучающихся вариантов, различны. Это означает, что зависимости, изображенные на рис. 119, в общем случае имеют вероятностный характер. Статистические характеристики этих зависимостей могут быть получены путем исследования по-

ведения различных вариантов модели на достаточно представительном множестве сред. Работы в этом направлении не связаны с принципиальными затруднениями, однако требуют больших затрат времени и имеют смысл в тех случаях, когда вероятностные свойства рассматриваемых зависимостей оказываются важными при решении конкретных задач. В рамках проведенного исследования нами изучались принципиальные возможности использования автоматов описанного типа. Поэтому представляется целесообразным провести дальнейшее изложение исходя из допущения о том, что среднеквадратичные отклонения рассматриваемых зависимостей достаточно малы по сравнению с расстояниями между кривыми, описывающими свойства различных вариантов обучающихся автоматов. Отказ от этого допущения не изменяет общей структуры излагаемых ниже рассуждений, а лишь требует использования при их проведении специального формального аппарата.

Пусть $A_0, A_1, \ldots, A_n$ — множество различных автоматов, реакции каждого из которых исследованы во множестве сред $S_1, S_2, \ldots, S_m$, принадлежащих некоторому диапазону сред. Автомат $A_0$ соответствует опорному варианту. Пусть результаты исследования представлены в виде кривых, аналогичных кривым на рис. 119. Иначе говоря, определены функции

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_i &= \hat{\alpha}_i(s), \\ \hat{\beta}_i &= \hat{\beta}_i(s), \\ \hat{\gamma}_i &= \hat{\gamma}_i(s), \qquad i = 0, 1, \ldots, n, \end{aligned} \tag{10.9}$$

где индекс $i$ указывает на то, что функция описывает реакции автомата $A_i$.

В зависимости от цели моделирования различным оценкам может приписываться разный вес. Так, можно потребовать от автомата как можно большей адекватности реакций, не придавая особого значения оценке качества функционирования и совсем пренебрегая видом траектории. Требования такого рода могут быть учтены заданием функции цели, ставящей в соответствие любому сочетанию значений $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$ некоторое значение обобщенного критерия $u$. В общем виде, следовательно,

$$u = u(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}). \tag{10.10}$$

Ясно, что по заданным функциям (10.9) и конкретному виду целевой функции для любого автомата $A_i$ ($i =$

$= 0, 1, \ldots, n$) может быть построена зависимость обобщенного критерия качества $u$ от оценки среды, т. е.

$$u_i = f_i(s), \qquad i = 0, 1, \ldots, n. \tag{10.11}$$

В качестве примера рассмотрим функцию цели, заданную в виде

$$u = \widehat{A\alpha} + \widehat{B\beta} + \widehat{C\gamma}, \tag{10.12}$$

где $A$, $B$, $C$ — весовые коэффициенты оценок. Пусть $A = B = C = 1$. В этом случае для исследованных выше автоматов зависимости (10.11) принимают вид, графически изображенный на рис. 119, *г*. Используем функции (10.11) для решения следующих задач оптимизации.

*Задача выбора оптимального варианта обучения для фиксированной среды.* Пусть имеется некоторая среда $S_c$; исследуя поведение в ней автомата $A_0$, получим его оценку $S_c$ и, следовательно, числовые значения $u_1, u_2, \ldots, u_n$ (поскольку функции (10.11) считаются заданными). Оптимальным вариантом $A^*$ явится такой автомат, для которого значение обобщенного критерия

$$u^* = \max |u_i|. \tag{10.13}$$

Так, на рис. 119,*г* для среды $S_A$ имеет место $A^* \equiv A_1$, для среды $S_B$ $A^* \equiv A_3$.

*Задача выбора оптимального «в среднем» варианта.* Пусть автомат функционирует в средах $S_1, S_2, \ldots, S_j, \ldots$, для которых оценка $S$ изменяется в диапазоне $(k - l)$. Вычислим для каждой из функций (10.11) значение $u_i$:

а) в случае, если функции (10.11) выражены аналитически в виде непрерывных функций,

$$u_i = \frac{1}{l-k} \int_k^l f_i(S)\, ds, \qquad i = 0, 1, \ldots, n; \tag{10.14}$$

б) в случае, если функции (10.11) заданы дискретно,

$$u_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} f_i(S_j), \qquad i = 0, 1, \ldots, n, \; j = 1, 2, \ldots, m, \tag{10.15}$$

где $j$ соответствует индексу среды.

Оптимальным вариантом будет автомат, для которого $u^* = \max|u_i|$. Для случая, изображенного на рис. 119, *г*, $A^* \equiv A_3$.

*Задача локальной оптимизации обучения.* Рассмотрим общий случай неоднородной среды, оценка различных областей которой меняется в определенном диапазоне. Ясно, что выбранный предыдущим способом оптимальный «в среднем» ва-

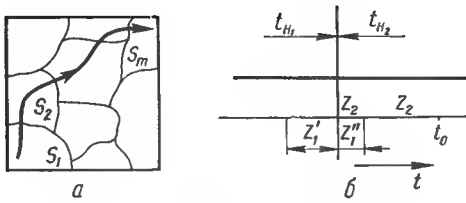



Рис. 120. Движение в неоднородной среде.

риант в некоторых из областей такой среды не будет являться наилучшим.

Автоматы $A_1$, $A_2, \ldots, A_n$ отличаются друг от друга различными значениями параметров обучения или, в общем случае, различными совокупностями исходных данных для программы, реализующей М-автомат. Пусть автоматам $A_1$, $A_2, \ldots, A_n$ соответствуют совокупности исходных данных $a_1$, $a_2, \ldots, a_n$. Для каждого из участков среды, внутри которого оценка примерно постоянна, предпочтительной оказывается группа исходных данных $a_i^*$, такая, что при ее использовании на данном участке $A_i \equiv A^*$.

Допустим, некоторый автомат передвигается в неоднородной среде так, как показано на рис. 120, *а*, где отграничены области с разной оценкой $s$. Пусть за время $T$ автомат пересек $r$ областей. В каждой из них обобщенный критерий $u$ принимает конкретное значение. Эффективность работы автомата за время $T$ охарактеризуем значением $q$:

$$q = \frac{1}{r} \sum_{p=1}^{r} u_p. \tag{10.16}$$

Максимальное значение $q$ будет получено в том случае, если в каждой из областей критерий $u$ будет принимать максимально возможное значение, для чего необходимо использовать в каждой из них совокупность исходных данных $a_i^*$. Локальная оптимизация обучения может быть построена, таким образом, как процедура максимизации $q$, осуществляемая путем переключения режимов обучения автомата при перемещении его в различные области среды.

Рассмотрим алгоритм оптимизации $Q$, который выполняет следующие операции. В начальный момент времени осуществляется случайный выбор совокупности исходных данных $a_i$ из множества $a_1, a_2, \ldots, a_n$ и автомат $A_i$ помещается в среду, где функционирует в течение некоторого времени $Z$ $|Z < T|$, называемого временем зондирования. По истечении времени $Z$ осуществляется (в соответствии с функцией цели) расчет значения критерия $u$. Пусть $u = u'$.

Примем, что функции $\{s_i = \varphi_i(u)\}$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ являются обратными относительно функций (10.11) и алгоритм $Q$ может обращаться как к тем, так и к другим.

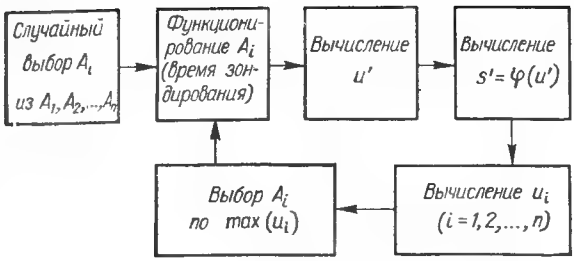



Рис. 121. Структура алгоритма локальной оптимизации.

По значению $u'$ с учетом функций, обратных функциям (10.11), вычисляется оценка $s$ среды, в которой функционирует $A_i$. Допустим, $s = s'$. Используя $s'$ и (10.11), получаем решение задачи выбора оптимального варианта обучения для фиксированной среды. При этом применяется критерий $\max|u_i|$ в соответствии с зависимостями (10.12). Пусть оказалось, что $A^* \equiv A_j$. Автомат $A_j$ продолжает функционировать в течение времени $Z$, после чего повторяется расчет $u$, нахождение $s'$ и т. д. Структура алгоритма $Q$ приведена на рис. 121.

В случае, если в неоднородной среде области с различными оценками $s$ выражены нечетко, при выборе $A^*$ по $s'$ и (10.11) может оказаться целесообразным критерий (10.13).

Обратимся к рис. 120. В ходе движения автомат пересекает различные области среды. Время его нахождения в каждой из них $t_н$ определяется размерами области и видом траектории движения. В общем случае, т. е. для множества возможных траекторий в данной фиксированной среде, $t_н$ можно рассматривать как случайную величину, имеющую некоторое распределение. Вид этого распределения зависит от топологических характеристик среды. Будем рассматривать в качестве характеристики данной среды значения математического ожидания $M(t_н)$. На рис. 120, *б* показан случай «перекрытия» этих периодов. Время зондирования $Z_1$ частично совпадает со временем нахождения автомата в области *1* и частично — в области *2*. Выработанные при этом величины $u'$ и соответственно $s'$ не будут отражать правильно свойств области *2*. Поэтому во все время $Z_2$ в области *2* будет функционировать неоптимальный вариант обучения и положение будет исправлено только в момент $t_0$. Ясно, что вероятность погрешностей такого рода будет уменьшена при выполнении условия

$$M(t_н) = nZ, \qquad n = 1, 2, \ldots \tag{10.17}$$

В целом оказывается, что значение $q'$ параметра (10.16), которое может обеспечить алгоритм $Q$ в данной среде, за-

висит от соотношения между значениями $M(t_н)$ и $Z$. Поскольку, однако, $M(t_н)$ есть характеристика данной среды, практически оказывается, что

$$q' = F(Z). \qquad (10.18)$$

Выражение (10.18) указывает, что работа алгоритма локальной оптимизации может быть оптимизирована подбором времени зондирования. Эта оптимизация, связанная с поиском в одномерном пространстве, выполняется с помощью известных методов.

Основным результатом работ, изложенных в настоящей главе, является следующее. Показано, что описанная ранее и реализованная в виде М-автомата модель двигательного поведения действительно оказалась способной решать соответствующие задачи. При этом содержательные интерпретации реакций модели, а также их количественные оценки позволяют сделать заключение об адекватности модели имеющимся качественным описаниям характерных реакций человека при решении аналогичных задач. Выводы другого рода связаны с оценкой языка М-сетей как инструмента моделирования. Продемонстрированы возможности представления в этом языке различного рода качественных и плохо формализованных данных (рефлексов, чувств и т. п.). Показана гибкость языка, т. е. возможность изменять поведение модели путем частных изменений ее структуры (параметров обучения, предорганизации исходных данных и т. п.), без изменения модели в целом. Модель естественно формализуется средствами существующих алгоритмических языков. Показано, кроме того, что исследованные в работе алгоритмы обучения эффективно улучшают поведение модели по сравнению с необучающимся вариантом. Предложены экспериментальные процедуры оптимизации обучения при изменении характера решаемых моделью задач.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обсуждении различных вопросов, связанных с построением систем ИР, неоднократно упоминалось о том, что в целом проблема имеет прикладной характер. Направленность на практическое использование получаемых результатов характерна не только для конечной цели систем ИР, способных к решению сложных интеллектуальных задач, но и для промежуточных этапов исследования.

Одним из таких промежуточных этапов можно считать разработку М-автоматов РЭМ и МОД, в которых реализован ряд важных положений исходной гипотезы. Полученные результаты при решении практических задач могут использоваться в двух различных направлениях.

Первое из них связано с применением аппарата и приемов моделирования, развитых при построении модели двигательного поведения. К настоящему времени в этом направлении сделан ряд конкретных разработок [25, 27, 28], показавших перспективность предложенного метода моделирования.

Второе направление связано с непосредственным использованием разработанных автоматов при решении задач управления. РЭМ и МОД являются относительно простыми М-автоматами «первого поколения», рассчитанными на решение задач ограниченного класса. Поэтому и характер их практического использования определяется теми возможностями, которые предоставляет выбранный при разработке этих автоматов сюжет моделирования. Иначе говоря, применение разработанных автоматов необходимо связано с задачами двигательного поведения. Проиллюстрируем одну из возможностей такого рода.

В настоящее время все большую актуальность приобретают задачи автоматизации управления передвижением различных технических устройств в естественной среде [6, 64, 71]. Речь идет об управлении такими объектами, как космические устройства, устройства для сбора информации, различные транспортные и обслуживающие средства и т. п. В ряде случаев участие в управлении человека-оператора нежелательно или невозможно и возникает проблема автоматизации его функций.

Рассмотренная выше задача моделирования двигательного поведения естественно интерпретируется в задачу управления движением. Для определённости будем иметь в виду задачу управления специализированными устройствами — «информационными роботами» [29].

Прежде всего, каждое устройство такого рода должно обладать системой датчиков, отражающих состояние окружающей среды. Информация о среде фиксируется значениями некоторых физических параметров на выходе датчиков (напряжением, частотой и т. п.). Сопоставим значения таких

параметров различным уровням возбужденности *i*-моделей, соответствующих измеряемым характеристикам среды (это оказывается возможным в подавляющем большинстве случаев). Таким образом, ситуация внешней среды, воспринимаемая устройством в каждый момент времени, может быть отображена совокупностью возбуждений «рецепторных» *i*-моделей управляющего М-автомата.

Далее, управляемое устройство должно быть способно выполнить в среде некоторые активные действия и, следовательно, должно иметь ряд эффекторных приспособлений. Выполнение устройством элементарного действия (движения по прямой, поворота, взятия пробы и т. д.) обеспечивается включением определенного эффектора или последовательностью таких включений, осуществляемых по жесткой программе. Каждой из этих операций может быть поставлена в соответствие *i*-модель из сферы «действий» М-автомата. Выбор одной из этих *i*-моделей системой усиления — торможения может интерпретироваться как принятие решения системой и перекодироваться в команду включения соответствующего эффектора.

Связи, которые можно заранее установить между «рецепторными» *i*-моделями и *i*-моделями «действий», составят систему «безусловных рефлексов» устройства. Задавая начальную структуру управляющего М-автомата, можно предопределить исходную логику его поведения в среде. В дальнейшем эта логика может изменяться в зависимости от «опыта» автомата.

Сфера «эмоций» М-автомата позволяет задать мотивацию поведения путем введения таких *i*-моделей, как «страх» перед опасными объектами, «любопытство», «осторожность», «голод» — показатель степени обеспеченности энергетическими ресурсами, «усталость» — показатель степени исправности или надежности функциональных систем и т. п.

Управляющий М-автомат может организовать целенаправленное поведение, если есть возможность заранее задать цель передвижений управляемого устройства или поисковое поведение на основе некоторых указаний общего характера, например: исследовать как можно больший район, пренебрегая деталями; детально исследовать заданный район; собрать информацию об объектах с заданными характеристиками; проводить исследования, считая, что выполнение задания важнее сохранения целостности, и т. п. Существует возможность повышения эффективности работы М-автомата путем введения в него имеющейся информации о характере исследуемой среды в виде, например, огрубленной карты. Если такой информации нет, то могут быть использованы программы «восприятия», ориентированные на совместную работу с М-сетью.

Проведенные работы составляют необходимый и достаточно важный этап исследования исходной гипотезы о составе и структуре программ переработки информации человеком. В разработанных М-автоматах нашла отражение только часть основных программ, реализация которых в полном объеме должна (согласно гипотезе) привести к построению системы, способной к разумному поведению при решении разнообразных задач. Рассмотрим кратко, какие именно возможности получит М-автомат в рамках разрабатываемого сюжета при введении новых, более сложных программ и каким образом введение этих программ может быть осуществлено.

Конечным результатом работ в интересующей нас области ИР должно явиться построение автомата в виде реального физического устройства, способного к сложному целесообразному поведению в естественной среде. Взаимодействие с естественной средой невозможно без реализации программы восприятия и первичной обработки внешней информации. Сюда входит настройка рецепторов на восприятие определенной информации, распознавание образов, временное хранение и предварительная обработка полученной информации. Весь этот процесс должен оканчиваться возбуждением определенных *i*-моделей в сфере восприятия М-сети автомата. Очевидно, что состояние М-сети в целом будет оказывать существенное влияние на ход этих процессов. Например, для настройки анализаторов на восприятие определенной информации необходимо знать, какая именно информация наиболее важна для автомата в данный момент. Определение же степени ее важности зависит от предыдущих состояний и задачи автомата. Так, на некотором этапе работы для автомата может оказаться важной только зрительная информация или только слуховая. При поиске конкретного объекта наиболее важными должны быть именно его существенные признаки и соответственно должны быть настроены все анализаторы автомата. Важность той или иной информации в М-сети определяет СУТ. Возможно, для обеспечения адекватной настройки анализаторов необходимо будет несколько специализировать алгоритмы СУТ, работающей на уровне сферы восприятия, и ввести дополнительные механизмы и алгоритмы изменения состояний *i*-моделей в самой сфере восприятия. Что касается организации анализаторных механизмов, то в этом направлении некоторые работы уже проведены [1, 2]. Кроме того, здесь могут быть использованы результаты многочисленных работ по распознаванию образов, проводимых другими исследователями.

Перспективы развития и усложнения М-автоматов во многом связаны с решением задачи организации вербального поведения, или иначе,— воспроизведением программ речи. Здесь особое внимание уделяется нами проблеме понимания

и синтеза осмысленной, а не только грамматически правильной речи. В программе речи слова выступают как символы образов, их пространственных, временных, качественных отношений и абстракций различного уровня. Смысл воспринятой речевой информации выделяется благодаря связям между *i*-моделями слов и *i*-моделями образов и эмоций. В общих чертах этот процесс можно описать следующим образом

*i*-Модели воспринятых слов прямо или опосредованно вызывают возбуждение соответствующих *i*-моделей образов и эмоций. Это возбуждение распространяется в М-сети, в результате чего вырабатывается общая эмоциональная оценка и возбуждаются новые *i*-модели образов и слов, обобщающие воспринятую информацию. В частном случае эти слова могут быть редукцией воспринятой фразы. В процессе понимания большую роль играет соотношение полученной информации с уже имеющимися знаниями. Организация таких процессов М-сетью в ряде случаев является весьма трудной задачей. Поэтому автомат, реализующий программы речи, удобно, по-видимому, представлять в виде неполного М-автомата и, следовательно, заранее ориентироваться на использование совместно с М-сетью алгоритмов различного рода.

Принципы организации и возможные пути воспроизведения программ речи в широком объеме рассмотрены нами пока только теоретически. Однако в настоящее время уже выполнены и некоторые экспериментальные исследования по организации речевого поведения с помощью М-сети. Работа проведена В. Д. Фоменко [61]. В построенной им модели механизмов речи представлены такие аспекты устной речи, как восприятие, осмысление и речевая экспрессия. Преимущественное внимание уделялось содержательной стороне процессов переработки вербальной информации. Модель реализована в виде необучающегося полного М-автомата и содержит следующие блоки: слуховых восприятий, сенсорный речевой, проприоцептивный речевой, понятийный, эмоций, мотивационный, двигательный речевой, артикуляторный и СУТ. Блоки модели соотнесены определенным мозговым образованиям. При задании организации М-сети использовались данные нейроморфологии, нейрофизиологии и клинической неврологии.

Проведенные В. Д. Фоменко исследования показали принципиальную возможность реализации речевого поведения полными М-автоматами. В то же время эти исследования позволили выявить и существенную трудность воспроизведения речевых функций при помощи М-сети, связанную со значительными размерами последней.

При современном состоянии техники, используемой для создания М-автоматов, более перспективной, очевидно, будет

замена ряда участков М-сети функциональным описанием их деятельности, т. е. построение неполных М-автоматов. Это позволит существенно расширить словарный запас автомата и объединить в одном устройстве структуры, ответственные за выполнение речевых функций, с сетью, организующей, например, двигательное поведение. Раздельное исследование, а затем объединение различных программ переработки информации представляется нам эффективным путем дальнейшего развития работ по ИР.

Наиболее сложной и, с нашей точки зрения, ключевой для решения многих задач ИР является представление программы сознания. Воспроизведение этой программы в ИР обеспечит пространственную и временную ориентации автомата, а также «понимание» им причинно-следственных отношений в окружающем автомат внешнем мире. В программе сознания можно выделить несколько уровней: внимание — выделение наиболее важной в данный момент информации; определение пространственных и временных взаимоотношений объектов; возможность предсказания их поведения; представления о собственном «Я» и «не Я»; воля — способность концентрировать и направлять внимание; воображение — способность различать реальное и нереальное.

Способ реализации одного из элементов сознания — внимания показан нами на примере описанных выше М-автоматов. Следующим шагом на пути усложнения М-автоматов может быть формирование представлений о собственном «Я» и «не Я». В настоящее время намечен подход к решению этой задачи. [11]. Он связан с построением алгоритмов, формирующих в обучающейся М-сети такую подсеть, которая отражает в своих *i*-моделях и связях наиболее часто повторяющиеся состояния автомата. Кроме того, в «Я» должны быть включены алгоритмы или структуры, фиксирующие результаты взаимодействия автомата с различными внешними объектами.

Таким образом, «Я» автомата соответствует его «представлению» о себе самом, или, иначе, является моделью себя. Формирование модели «Я» должно происходить, по всей вероятности, параллельно с формированием моделей «не Я». Последние можно понимать как модифицированные модели «Я». Ведущую роль в формировании моделей «не Я», по нашему мнению, играет механизм сопереживания, т. е. отождествления себя с другим объектом. Действия этого объекта используются для коррекции модели «Я», а после определенного опыта взаимодействия или наблюдений «Я» модифицируется и выделяется самостоятельная модель «не Я», отражающая представление автомата о данном объекте. Параллельно с формированием новой модели «не Я» происходит и коррекция, дополнение модели «Я».

Модели «Я» и «не Я» могут использоваться автоматом для планирования собственных действий и экстраполяции действий других объектов, способных к активному поведению. Таким образом, на этом этапе автомат будет способен к эффективному поведению в динамических средах. Прогнозирование своих и чужих действий тесно связано с еще одним элементом сознания — воображением, поскольку автомат должен уметь отличать воображаемую, нереальную, ситуацию и свои или чужие (предполагаемые) действия в ней от ситуации реальной, требующей конкретных действий.

Представление в автомате воображаемых ситуаций может быть достигнуто путем формирования специфичной «разовой» внутренней модели — фрагмента общей внутренней модели среды. Необходимо именно формирование фрагмента, а не выделение его на общей внутренней модели, поскольку должна существовать возможность различных преобразований воображаемой ситуации. Различение реальной ситуации от воображаемой может быть достигнуто благодаря торможению или какому-нибудь иному изменению функции СУТ на сфере восприятия. Возможно, в автомате окажется целесообразным притормаживать деятельность рецепторов при «просмотре» воображаемых ситуаций, как это происходит у человека. Однако специальные сигналы, однозначно определяющие режим восприятия автомата, должны быть предусмотрены во всех случаях.

Реализация моделей «Я» и «не Я» позволит автомату «продумывать» каждое действие и проверять на внутренней модели возможные его последствия. Сознательное планирование собственных действий связано с решением проблем пространственно-временной ориентировки и «воли». Вообще, все элементы сознания тесно взаимосвязаны и, по всей вероятности, должны исследоваться комплексно. Естественно, в зависимости от назначения автомата те или иные аспекты сознания могут быть воспроизведены более или менее подробно, однако полное исключение каких-либо элементов должно существенно сказываться на «уровне разумности» поведения.

Заканчивая обсуждение, отметим, что перспективы дальнейшего развития работ в области практического использования М-автоматов и усложнения реализуемых ими функций связаны, по-видимому, с разработкой методов и техники построения М-автоматов в виде физических устройств. Принцип создания таких устройств определяется тем, что М-сеть конструируется из большого числа однотипных элементов. Предварительные работы по построению физических аналогов М-сетей [8, 35] показали принципиальную возможность создания систем весьма большого объема.

Необходимость представления М-автоматов в виде физических устройств обусловлена, прежде всего, спецификой ряда практически важных задач, в которых применение М-автоматов оказывается целесообразным. Здесь имеется в виду в основном создание автономных информационных роботов, способных организовывать разумное поведение в сложных условиях естественной среды.

Проблема разработки физического аналога М-сетей представляет интерес также и в связи с тем, что ряд особенностей такого устройства — распределенная память, параллельная переработка информации, совмещение операций запоминания, переработки и выборки информации — позволяют рассматривать его как один из вариантов реализации вычислительных сред, с развитием которых связываются перспективы построения вычислительных машин пятого поколения.

ЛИТЕРАТУРА


1. Агабабян К. Г. Автореферат канд. дис. Ин-т кибернетики АН УССР, К., 1969.
2. Агабабян К. Г.— ДАН СССР, 1971, 199, 5.
3. Адамар Ж. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. «Советское радио», М., 1970.
4. Амосов Н. М. Моделирование мышления и психики. «Наукова думка», К., 1965.
5. Амосов Н. М. Искусственный разум. «Наукова думка», К., 1969.
6. Амосов Н. М., Касаткин А. М., Касаткина Л. М., Шор И. З.— В кн.: Некоторые проблемы биокибернетики, применение электроники в биологии и медицине, 3. Изд. ИК АН УССР, К., 1967.
7. Амосов Н. М.— Кибернетика, 1968, 2.
8. Амосов Н. М., Куссуль Э. М.— В кн.: Вопросы эвристического моделирования, 1. Изд. ИК АН УССР, К., 1969.
9. Аткинсон Р., Бауэр Г., Кротерс Э. Введение в математическую теорию обучения. «Мир», М., 1969.
10. Аттли А.— В кн.: Кибернетический сборник, 8. «Мир», М., 1964.
11. Белов В. М.— В кн.: Биологическая, медицинская кибернетика и бионика, 1. Изд. ИК АН УССР, К.. 1971.
12. Бернштейн Н. А.— Вопросы философии, 1962, 8.
13. Буш Р., Мостеллер Ф. Стохастические модели обучаемостн. Физматгиз, М., 1962.
14. Ван Хао — В кн.: Кибернетический сборник, 5. ИЛ, М., 1963.
15. Галамбос Р.— В кн.: Кибернетика и живой организм. «Наукова думка», К., 1964.
16. Гелернтер Г.— В кн.: Вычислительные машины и мышление. «Мир», М., 1967.
17. Гелернтер Г., Рочестер Н.— В кн.: Психология мышления. «Прогресс», М., 1965.
18. Глушков В. М. Кибернетика и умственный труд. «Знание», М., 1965.
19. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов. Физматгиз, М., 1962.
20. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. Физматгиз, М., 1962.
21. Гутчин И. Б., Кузичев А. С. Бионика и надежпость. «Наука», М., 1967.
22. Джордж Ф. Мозг как вычислительная машина. ИЛ. М., 1963.
23. Емельянов-Ярославский Л. Б.— В кн.: Самообучающиеся автоматические системы. «Наука», М., 1966.
24. Запорожец А. В и др. Восприятие и действне. «Просвещение», М., 1967.
25. Иваник М. М., Касаткин А. М.— Геологический журнал, 1968, 18, 6.
26. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. «Техніка», К., 1969.
27. Касаткин А. М., Мельников В. Г., Попов А. А.— В кн.: Некоторые проблемы биокибернетики, применение электроники в биологии и медицине, 3. Изд. ИК АН УССР, К., 1967.
28. Касаткин А. М., Ткаченко В. В.— В кн.: Вопросы проектирования сложных систем контроля и управления. Изд. ХВКИУ, Харьков, 1969.
29. Катыс Г П. и др. Информационные работы и манипуляторы. «Энергия», М., 1968.
30. Коган А. Б., Чароян О. Г.— В кн.: Бионика и математическое моделирование в биологин. Изд. ИК АН УССР, К., 1967.

31. Кольцова М. М. Обобщение как функция мозга. «Наука», Л., 1967.
32. Конорски Ю. Интегративная деятельность мозга. «Мир», М., 1970.
33. Кларксон Дж.— В кн.: Вычислительные машины и мышление. «Мир», М., 1967.
34. Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматики и технической кибернетики. Госэнергоиздат, М.— Л., 1962.
35. Куссуль Э. М.— В кн.: Рефераты докладов IV Всесоюзной конференции по нейрокибернетике. Изд-во Ростовского ун-та, Ростов, 1970.
36. Лоулин Дж.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, 1.
37. Миллер Дж. А.— В кн.: Инженерная психология. «Прогресс», М., 1964.
38. Миллер Д., Галантер Ю., Прибрам К. Планы и структура поведения. «Прогресс», М., 1965.
39. Моцкус И. Б. Многоэкстремальные задачи в проектировании. «Наука», М., 1967.
40. Напалков А. В. Эвристическое программирование. Изд-во Ростовского ун-та, Ростов, 1971.
41. Ньюэлл А., Саймон Г.— В кн.: Вычислительные машины и мышление. «Мир», М., 1967.
42. Общая психология. Под ред. А. В. Петровского. «Просвещение», М., 1970.
43. Пиаже Ж. Избранные психологические труды. «Просвещение», М., 1969.
44. Пойа Д. Как решать задачу. «Учпедгиз», М., 1961.
45. Пойа Д. Математическое открытие. «Наука», М., 1970.
46. Пономарев Я. А.— Вопросы психологии, 1964, 6.
47. Пономарев Я. А. Знания, мышление и умственное развитие. «Просвещение», М., 1967.
48. Поспелов Д. А. Игры и автоматы. «Энергия», М.— Л., 1966.
49. Поспелов Д. А., Пушкин В. Н. Мышление и автоматы. «Советское радио», М., 1972.
50. Пуанкаре А. Математическое творчество. Психологический этюд. Юрьев, 1903.
51. Пушкин В. Н. Эвристика — наука о творческом мышлении. Политиздат, М., 1967.
52. Радченко А. Н. Моделирование основных механизмов мозга. «Наука», Л., 1968.
53. Растригин Л. А.— В кн.: Адаптивные системы, 1. «Зинатне», Рига, 1972.
54. Рейтман У. Р. Познание и мышление. «Мир», М., 1968.
55. Симонов П. В. Теория отражения и психофизиология эмоций. «Наука», М., 1970.
56. Соколов Е. Н. Механизмы памяти. Изд-во Московского ун-та, М., 1969.
57. Тьюринг А. Может ли машина мыслить? Физматгиз, М., 1960.
58. Ухтомский А. А. Доминанта. «Наука», М.— Л., 1966.
59. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Физматгиз, М., 1963.
60. Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. «Мир», М., 1969.
61. Фоменко В. Д. Автореферат канд. дис. Институт экспериментальной медицины АМН СССР, Л., 1972.
62. Фейгенбаум Э., Фельдман Дж.— В кн.: Вычислительные машины и мышление. «Мир». М., 1967.
63. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. «Наука», М., 1969.

64. Человеческие способности машин. «Советское радио», М., 1971.
65. Шамис А. Л. Автореферат канд. дис. АМН СССР, М., 1968.
66. Штайнбух К. Автомат и человек. «Советское радио», М., 1967.
67. Юдин Д. Б.— Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1965, 1.
68. Якубович В. А.— Автоматика и телемеханика, 1969, 8.
69. Andreaє J. H. — In: Proc. IFAC Congress, 1964.
70. Andreae J. H., Gaines B. R. An Introductory Description of the STELLA learning Machine. Standard telecommunication Laboratories, Harlow-Easex, 1966.
71. Bertram R.— In: Lecture Notes Operation Research and Mathematical Systems, 1970. 28.
72. Bower G. H., Trabasso T. R.— In: Studies in mathematical psychology. Stanford Univ. Press, Stanford, 1964.
73. Bruner A. O. A study of thinking. Wiley, New York, 1956.
74. Doran J. E. Criterie for intelligence in a programmed automaton. University of Edinburg, Edinburg, 1967.
75. Doran J. E. Designing a pleasure — seeking Automaton. University of Edinburg, Edinburg, 1967.
76. Doran J. E. Experiments with a pleasure — seeking Automaton. University of Edinburg. Edinburg, 1967
77. Hebb D. O. The Organization of behaviour. Wiley, New York, 1949.
78. Loehlin J. C. Computer models of personality. Random House, New York, 1968.
79. Loehlin J. C.— Science Journal, 1968, 4, 10.
80. Milner P. M.— Psychological Review, 1957, 64.
81. Uttley A. M.— EEG Clinical Neurophysiology, 1954, 6.
82. White H.— Bull. Math. Biophys., 1961, 23.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . . 5

**Часть первая**

**ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОБЛЕМЕ «ИСКУССТВЕННЫЙ РАЗУМ»**

***Раздел I.*** **Искусственный разум и модели разумного поведения человека** . . . . . 11

*Глава 1.* Проблема «искусственный разум» . . . . . 12

§ 1. Задачи автоматизации разумной деятельности (13). § 2. О структуре проблемы (14).

*Глава 2.* Основные подходы к созданию моделей разумного поведения . . . . . 18

§ 1. Феноменологические модели поведения (18). § 2. Модели процессов переработки информации (32). § 3. Модели «механизмов» переработки информации (35). § 4. Общая схема моделирования (41). § 5. Исследования смешанного типа (44). § 6. Исследования по редуцированной схеме (45). § 7. Исследование больших гипотез (48).

***Раздел II.*** **М-автоматы и программы разумной деятельности** 52

*Глава 3.* Основные положения рабочей гипотезы . . . . . 53

§ 1. Мозг как моделирующая система (53). § 2. Понятие о программах (58). § 3. Автоматы и среды (61). § 4. Общая структура гипотезы (63).

*Глава 4.* Аппарат моделирования . . . . . 66

§ 1. М-автоматы. Основные понятия (68). § 2. Пример построения М-автомата (80). § 3. Процессы в М-сети и психические процессы. Некоторые аналогии (99). § 4. Обсуждение (137).

*Глава 5* Моделирование двигательного поведения . . . . . 141

§ 1. Общие требования к моделям. Стратегии проверки больших гипотез (141). § 2. Двигательное поведение как объект моделирования (145).

**Часть вторая**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ М-АВТОМАТОВ**

***Раздел III.*** **М-автомат РЭМ. Формирование двигательного поведения** . . . . . 169

*Глава 6.* Модель двигательного поведения РЭМ . . . . . 169

§ 1. Блок-схема модели (170) § 2. Структура М-сети автомата (173). § 3. Динамика М-автомата (178). § 4. Планирование поведения (180). § 5. Реализация М-автомата РЭМ (194).

*Глава 7.* Эксперименты с М-автоматом РЭМ . . . . . 203

§ 1. Экспериментальное исследование М-автомата РЭМ-1 (203). § 2. Семантика М-сети автомата (209). § 3. Экспериментальное исследование М-автомата РЭМ-2 (212) § 4. Влияние выработанного плана на поведение автомата (231). § 5. Взаимодействие моделей планирования и передвижения (234).

***Раздел IV.*** **М-автомат МОД. Исследование адаптивного поведения** . . . . . 237

*Глава 8.* Модель двигательного поведения МОД . . . . . 240

§ 1. Общая схема М-автомата (240). § 2. Динамика М-автомата (245). § 3. Реализация М-автомата (246).

*Глава 9.* Исследование элементарных процессов обучения . . . 260

§ 1. Выбор значений параметров пересчета и установления связей (261). § 2. Демонстрационные тесты (264). § 3. Выбор значений параметров проторения связей. Задача избегания наказаний (277). § 4. Выбор значений параметров затухания связей. Задача повторения последовательностей (281). § 5. Исследование взаимодействия элементарных процессов обучения. Задача формирования понятий (286). § 6. Обсуждение результатов (306).

*Глава 10.* Эксперименты с моделью двигательного поведения . . 312

§ 1. Дополнительные сведения о модели МОД (312). § 2. Способы представления и обработки результатов (318). § 3. Исследование предорганизации модели (332). § 4. Варианты обучения (338). § 5. Эксперименты с М-автоматами в различных средах (344). § 6. Влияние памяти М-автомата на адекватность его внутренних реакций (349). § 7. Обсуждение результатов (355).

Заключение . . . . . 364

Литература . . . . . 371

**Николай Михайлович Амосов**
**Александр Михайлович Касаткин**
**Лора Михайловна Касаткина**
**Семен Алексеевич Талаев**

# АВТОМАТЫ И РАЗУМНОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Опыт моделирования

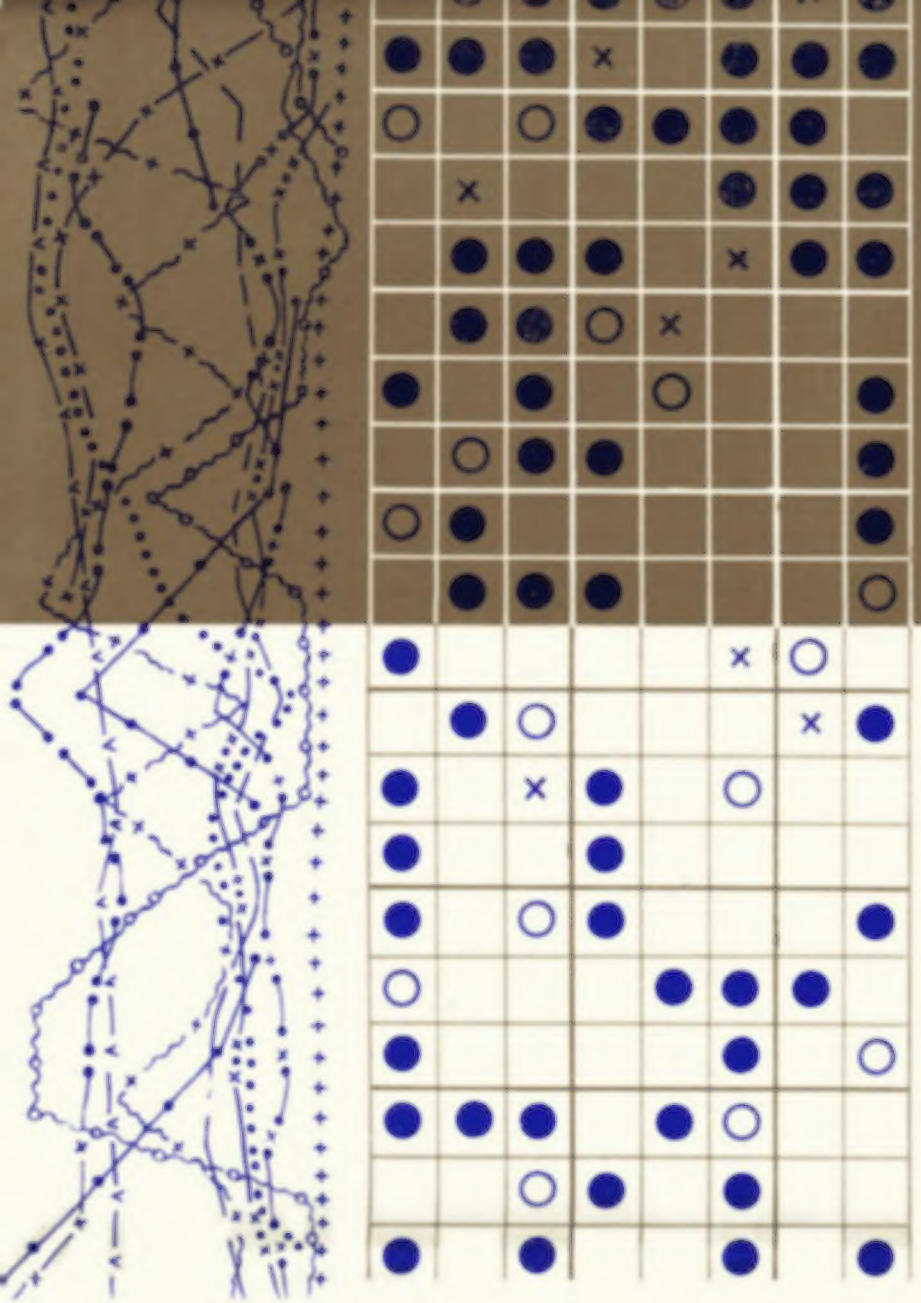
*Печатается по постановлению ученого совета Института кибернетики АН УССР*

Редактор С. Д. Кошис
Художественный редактор И. П. Антонюк
Оформление художника Д. Д. Грибова
Технические редакторы
Б. М. Кричевская, М. А. Притыкина
Корректор Е. А. Михалец

Сдано в набор 4.V 1973 г.
Подписано к печати 12.XI 1973 г.
БФ 00550. Зак. № 3—1176. Тираж 4600.
Бумага № 1, 70×90$^{1}/_{16}$.
Учетно-изд. листов 24,86. Усл. печ. листов 27,5.
Цена 3 руб. 15 коп.

Издательство «Наукова думка». Киев, Репина, 3.

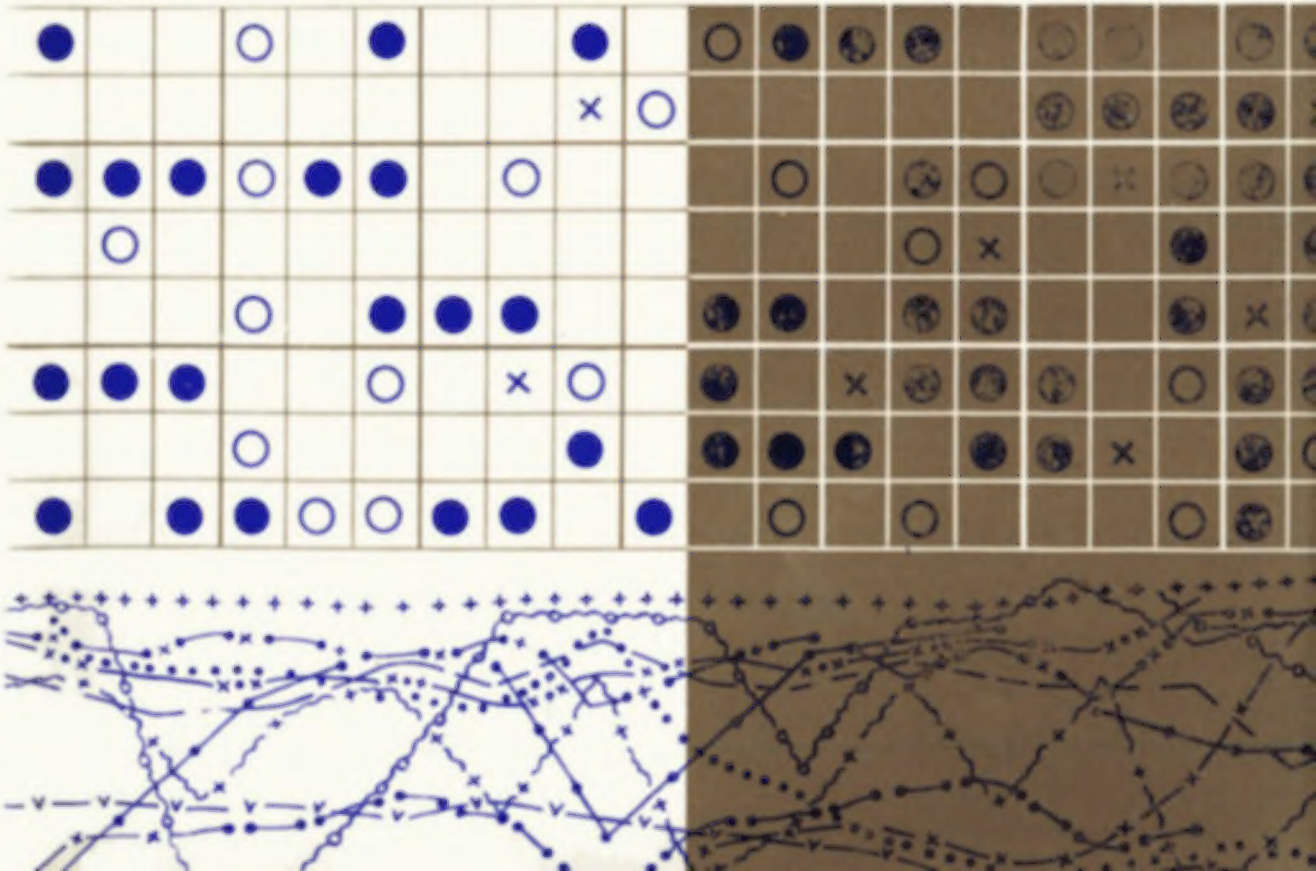
Головное предприятие республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, г. Киев, Довженко, 3.



# Автоматы и разумное поведение

Н. М. Амосов
А. М. Касаткин
Л. М. Касаткина
С. А. Талаев

# Автоматы и разумное поведение



Автоматы и разумное поведение

Книга посвящена актуальному научному направлению — проектированию и исследованию систем типа «искусственный разум». Описаны модели, иллюстрирующие применение исходной гипотезы для построения систем разумного поведения. В качестве объекта исследования выбран процесс организации двигательного поведения в «естественных» средах.

Анализируется структура разумного поведения, дается сравнительный анализ используемых алгоритмов обучения и приемов настройки сложных моделей. Рассматриваются алгоритмы и блок-схемы, описывающие вычислительные программы моделей.

Рассчитана на кибернетиков и психологов, интересующихся вопросами построения сложных систем.